



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Komplexní systém pro měření
akustické intenzity**

**Complex system of sound intensity
measurement**

Liberec 2005

Martin Junek

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: 2612 – Elektrotechnika a informatika

Obor: 3902T005 – Automatické řízení a inženýrská informatika

Komplexní systém pro měření akustické intenzity

Complex system of sound intensity measurement

Martin Junek

Vedoucí práce: Doc.Ing.Ivan Jaksch, CSc.

Konzultant: Ing. Jiří Mareš

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Katedra: měření

Akademický rok: 2003/2004

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro: **Martina Junka**

studijní program: M 2612 – Elektrotechnika a informatika

obor: 3902T005 – Automatické řízení a inženýrská informatika

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona o vysokých školách č.111/1998 Sb. určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu:

Komplexní systém pro měření akustické intenzity

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s teoretickými základy měření akustické intenzity zvuku.
2. Seznamte se s metodikou měření na akustické sondě B&K 3599 ve spojení s multi-analyzátozem PULSE.
3. Navrhněte možnosti jejího zlepšení zejména v oblasti vizualizace výsledků a automatizace nastavení analyzátoru.
4. Vybrané úpravy realizujte.
5. Na modelových nebo reálných případech demonstřujte komplexní měření a analýzu akustické intenzity hluku.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace

Rozsah průvodní zprávy: cca 40 až 50 stran

Seznam odborné literatury:

- [1] J.R.Hassahl, K.Zaveri, M.Phillips.:Acoustic Noise Measurement, Bruel Kjaer
- [2] C.Smetana a kol.: Hluk&Vibrace, Měření a hodnocení
- [3] Intensity Measurement, Hewlett Packard
- [4] Technical documentation PULSE

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Ivan Jaksch, CSc.

Konzultant:

Ing. Jiří Mareš

Zadání diplomové práce:

23. 10. 2004

Termín odevzdání diplomové práce:

21. 5. 2005

L.S.

.....
Vedoucí katedry

.....
Děkan

V Liberci dne

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci, dne 18.5.2005

Podpis:

Poděkování

Rád bych poděkoval Doc. Ing. Ivanu Jakschovi, CSc. za odborné vedení a pomoc při zpracování diplomové práce a stejně tak Ing. Jiřímu Marešovi za cenné rady, poskytnuté informace i vřelou podporu a trpělivost.

Komplexní systém pro měření akustické intenzity
Complex system of sound intensity measurement

Anotace:

Diplomová práce teoreticky i prakticky popisuje návrh systému intenzitních měření s důrazem na vizualizaci výsledků. Rozebírá možnosti využití akustické sondy B&K 3599 ve spojení s multianalyzátozem PULSE a uplatnění při lokalizaci zdrojů hluku, stanovení akustického výkonu a tvorbě intenzitních map. Pro ovládání měřicího systému byla v prostředí MATLABu naprogramována aplikace s grafickým rozhraním, která proces měření automatizuje, zpracovává naměřená data do grafické i textové formy a umožňuje jejich export. Podstatným výstupem programu jsou intenzitní mapy, pro jejichž tvorbu využívá aplikace algoritmus aproximace naměřených intenzitních hladin. Funkčnost navrženého systému byla úspěšně testována na reálném případě.

Abstract:

The diploma work describes both theoretically and practically suggestion of the sound intensity measuring system, being focused on visualisation of the results. It deals with usage possibilities of sound intensity probe B&K 3599 in connection with PULSE analyzer and at localization of noise sources, setting of sound power and sound intensity map creating. For handling the measuring system, in MATLAB setting there was programmed the application with graphical user interface that automates the measuring process, processes the measured data into both graphic and textual form and enables their export. The essential output of the program are sound intensity maps. To create them, the application uses an algorithm of measured sound intensity levels approximation. Functioning of the suggested system has been tested successfully in a real case.

Obsah

Seznam použitých zkratk	8
Seznam použitých symbolů	9
1. Úvod	10
2. Teoretická část	11
2.1 Akustická intenzita	11
2.2 Zvuková pole	12
2.2.1 Volné pole	12
2.2.2 Difúzní pole	13
2.2.3 Aktivní a reaktivní pole	13
2.2.4 Stálé vlny	13
2.2.5 Blízké pole	14
2.3 Měření akustické intenzity	14
2.3.1 Intenzitní sonda	15
2.3.2 Analyzátor intenzity hluku	15
2.3.3 Výpočet akustické intenzity z hodnot tlaku a rychlosti	16
2.3.4 Intenzitní měření pro stanovení akustického výkonu (norma ISO 9614)	18
2.3.4.1 Metoda měřením v bodech (ČSN ISO 9614-1)	19
2.3.4.2 Metoda skanováním (ČSN ISO 9614-2)	23
2.3.5 Chyby měření	24
2.3.5.1 Chyba při měření vysokých frekvencí	24
2.3.5.2 Chyba při měření nízkých frekvencí	25
2.3.5.3 Měření malých změn fáze	27
2.3.5.4 Reziduální intenzita	27
2.3.5.5 Normy fázové přesnosti analyzátorů	27
2.3.5.6 Chyba fázové změny	28
2.3.5.7 Chyba Off-Axis	29
2.3.6 Základní konfigurace měřících prostředků	30
2.3.6.1 Volba frekvenčního rozsahu	30
2.3.6.2 Volba distanční mezery	31
2.3.7 Vizualizace výsledků měření akustické intenzity	32
2.4 Metodika měření na analyzátoru PULSE a sondě B&K 3599	33
2.4.1 Multianalyzátor PULSE	33
2.4.1.1 Architektura a systém multianalyzátoru PULSE	34
2.4.2 Akustická sonda B&K 3599	37
3. Praktická část	38
3.1 Návrh zlepšení metodiky měření a realizace navržených úprav	38
3.1.1 Měřicí systém	38
3.1.2 Uživatelská aplikace	40
3.1.2.1 Popis prostředí	40
3.1.2.2 Programová struktura	42
3.1.3 Proces měření akustické intenzity	43
3.1.3.1 LabShop PULSE	44

3.1.3.2 Průběh funkce <i>pulse_intensit.m</i>	45
3.1.4 Aproximace dat a výpočet hladin akustické intenzity	46
3.1.4.1 Maticová metoda	47
3.1.4.2 Vektorová metoda	47
3.1.4.3 Výpočet intenzitních hladin	47
3.1.5 Vizualizace výsledků	48
3.1.5.1 Intenzitní mapy	48
3.1.5.2 Výkonová spektra	49
3.1.5.3 Zobrazení intenzitních hladin	49
3.1.6 Výpočet akustického výkonu	50
3.1.7 Systém správy dat	51
3.1.7.1 Centrální archivace projektů intenzitních měření	51
3.1.7.2 Export naměřených dat	52
3.1.7.2.1 Obrazové soubory	52
3.1.7.2.2 Textové soubory	53
3.2 Demonstrace měření na reálném příkladu	54
3.2.1 Lokalizace zdrojů hluku tkacího stroje	54
3.2.2 Stanovení hladiny celkového akustického výkonu klimatizační jednotky	56
4. Závěr	59
Literatura	60
Přílohy	61

Seznam použitých zkratk

CPB (Constant Percentage Bandwidth) – analýza s konstantní relativní šířkou pásma

ČSN (Česká Státní Norma) – česká technická norma

FFT (Fast Fourier Transform) – rychlá Fourierova transformace

IEC (International Electrotechnical Commission) – mezinárodní elektrotechnická komise

ISO (International Organization for Standardization) – mezinárodní institut pro standardizaci

OLE (Object Linking and Embedding) – metoda spojování a vkládání objektů

PC (Personal Computer) – osobní počítač

P-I index (Pressure - Intensity index) – rozdíl hladin tlaku a intenzity

RMS (Root Mean Square) – efektivní hodnota

SI (Système International d' Unités) – mezinárodní soustava jednotek

SNR (Signal to Noise Ratio) – odstup signálu od šumu

SPL (Sound Pressure Level) – hladina akustického tlaku

Seznam použitých symbolů

P	tlak
ρ	hustota prostředí
c	rychlost šíření akustické vlny
L_p	hladina akustického tlaku
L_W	hladina akustického výkonu
I	akustická intenzita
W	akustický výkon
A, S	velikost plochy
F	síla
v	rychlost
$\frac{\partial P}{\partial x}(x, t)$	gradient tlaku
$\frac{\partial v}{\partial t}(x, t)$	zrychlení
Δr	vzdálenost mikrofónů
n	jednotkový vektor kolmý k ploše
F_i	indikátor zvukového pole
$L_{ In s}$	střední hodnota akustické intenzity na ploše
L_{ps}	střední hodnota akustického tlaku na ploše
$ I_{ni} $	normálová složka intenzity
δ_{p10}	index zbytkové intenzity
b	šířka pásu plochy
λ	vlnová délka
ϕ	měřený fázový rozdíl, fázový úhel
$\pm\theta_e$	fázová přesnost
L_{RPI}	reziduální P-I index
L_{PI}	P-I index

1. Úvod

Nutnost měření akustické intenzity je v technických oblastech velmi dobře známa a nachází široké spektrum uplatnění. Její hlavní využití spočívá v určení celkového akustického výkonu strojů a zařízení, kde nahrazuje často používaný způsob tlakových měření, prováděný ve většině případů v nákladných akustických komorách. Intenzitní metoda je významná díky univerzálnosti použití – dovoluje jak měření v běžných provozních podmínkách, za přítomnosti stálého hluku na pozadí, tak i měření v blízkém poli. Kromě použití při stanovení celkového akustického výkonu zařízení je také nástrojem pro lokalizaci zdrojů hluku nebo tvorbu intenzitních map.

Narozdíl od tlaku, měřeného přímo mikrofonom, je intenzita zvuku počítána real-timeovou analýzou, a to z hodnot tlaku a rychlosti částic. Dvougromfonová intenzitní sonda za tímto účelem snímá tlakové rozdíly, analyzátor intenzity zvuku pak počítá z naměřených hodnot rychlost (užitím Eulerova vztahu), průměrný tlak a následně akustickou intenzitu. Ta je definována jako tok energie jednotkou plochy.

Cílem diplomové práce je návrh a realizace komplexního měřicího systému, který proces měření zautomatizuje. Navrhovaný systém by měl splňovat požadavky normy ISO 9614, nároky na variabilitu a mobilitu a zároveň zpracovávat naměřené hodnoty.

Základní myšlenka realizace spočívá v rozšíření dosavadního měřicího řetězce (obsahujícího pouze analyzátor a sondu) o uživatelskou aplikaci, která vhodným způsobem zautomatizuje celý proces měření a stane se prostředkem pro konfiguraci přístrojů, zpracování dat a vizualizaci výsledků. Aplikace by měla plně spolupracovat s dostupnými prostředky pro měření (formou softwarové komunikace mezi komponentami řetězce) – s akustickou sondou B&K 3599, s multianalyzátozem PULSE a s jeho softwarovým vybavením. Součástí aplikace bude i grafické rozhraní, poskytující několik variant vizualizace naměřených dat .

Aplikace také řeší problém orientace v procesu měření a zefektivnění práce s výsledky. Obsahuje proto komplexní systém pro jejich správu – archivaci, export ve tvaru obrazových nebo textových souborů a začleňování do projektů.

2. Teoretická část

V této části práce je uceleným způsobem zpracována teorie intenzitních měření, včetně základních poznatků o akustické intenzitě, akustických polích a metodice měření na použitých prostředcích – intenzitní sondě a analyzátoru.

2.1 Akustická intenzita

Akustická intenzita je definována jako tok akustické energie v daném směru. Protože je to veličina vektorová, může být použita k určení veličiny vycházející z dané plochy. Měření akustické intenzity se tedy s úspěchem a velmi často využívá pro stanovení celkového akustického výkonu. Celkový akustický výkon může být tímto v technické praxi poměrně novým způsobem vypočítán za přispění všech dílčích výsledků, určených z jednotlivých ploch, tzn. i dílčích zdrojů hluku.

Intenzita se skládá ze dvou částí – aktivní a reaktivní (jalové). Akční složku reprezentuje tok energie a je způsobena rozdíly tlaku, oproti tomu reaktivní složka je taková energie, která je obsažena v akustickém médiu a nemůže zapříčinit tok. Analyticky, aktivní složka je odlišována od reaktivní fází rychlosti částic poměrně k tlaku. V aktivním prostředí jsou tlak a rychlost ve fázi, a proto dochází k přenosu energie (vznik toku energie). V reaktivním prostředí tomu tak není, rychlost částic je nulová.

Intenzita zvuku popisuje míru (množství) energie, která proudí jednotkou plochy. V systému jednotek SI je to 1 m^2 , proto je jednotkou intenzity Watt na metr čtverečný ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$). Značkou akustické intenzity je velké písmeno I , často doplňované o dolní index značící směr, ve kterém intenzitu měříme. Bezindexové označení (a také nejčastější) vyjadřuje směr kolmý k dané ploše, přes kterou akustická energie proudí.

Hladiny akustické intenzity L_I (stejně jako hladiny akustického tlaku a výkonu L_p , L_W) jsou všechny měřeny v decibelech (dB). Decibel je poměr, měřený vzhledem k jisté referenční úrovni. Speciálně pro tlak je referenční úroveň zvolena tak, aby korespondovala s prahovou úrovní slyšitelnosti. Hladina akustické intenzity:

$$L_I = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}], \quad (2.1)$$

$$I_0 = 1 p W \cdot m^{-2}.$$

Referenční hladiny jsou u akustických veličin zvoleny tak, aby přibližně odpovídaly použití ve vztazích, které platí pro volné pole, kde jsou si hladiny intenzity a tlaku ve směru šíření číselně rovny. Rozdíl mezi hladinou tlaku a intenzity je velmi důležitou veličinou, známou jako *P-I index (pressure-intensity index)*. Pro vyložení problematiky intenzitních měření je namístě zmínit se o některých druzích zvukových polí.

2.2 Zvuková pole

Zvuková pole jsou oblasti, ve kterých se vyskytuje zvuk. Jsou klasifikována podle způsobu a prostředí, ve kterém se zvukové vlny šíří. Je třeba podotknout, že přesný vztah mezi tlakem a intenzitou je přesně znám pouze v prvních dvou speciálních případech z níže uvedených.

2.2.1 Volné pole

Tento výraz popisuje šíření zvuku v idealizovaném volném prostoru, kde se nevyskytují žádné odrazy. Tyto podmínky splňuje venkovní prostředí (v dostatečné vzdálenosti od zemského povrchu) nebo bezodrazová komora, kde je veškerý zvuk, narážející do stěn, pohlcován. Šíření ve volném poli je charakterizováno 6-ti decibelovým poklesem hladiny akustického tlaku (*SPL – sound pressure level*) a hladiny intenzity (ve směru šíření zvuku) s každým zdvojnásobením vzdálenosti od zdroje (platí pro bodový zdroj). Vztah mezi akustickým tlakem a akustickou intenzitou (pouze velikostí, nikoliv směrem) je znám:

$$|I| = \frac{p_{rms}^2}{\rho c} \quad [W \cdot m^{-2}], \quad (2.2)$$

kde p_{rms} ... tlak, ρ ... hustota prostředí a c ... rychlost šíření vln.

Je to jeden ze způsobů zjištění akustického výkonu, který je popsán v mezinárodním standardu ISO 3745.

2.2.2 Difúzní pole

V difúzním poli je zvuk odrážen tolikrát, že se pohybuje všemi směry se stejnou velikostí a pravděpodobností výskytu. Toto pole je aproximováno v odrazné (bezdozvukové) místnosti. Ačkoli je intenzita rovna nule, existuje teoretický vztah mezi tlakem v místnosti a jednostrannou intenzitou, I_x . To je intenzita v jednom směru, která nebere v potaz rovné nebo protějšší složky. Při měření tlaku můžeme použít vztah mezi tlakem a jednostrannou intenzitou ke stanovení akustického výkonu:

$$I_x = \frac{p_{rms}^2}{4\rho c} \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}], \quad (2.3)$$

kde p_{rms} ... tlak, ρ ... hustota prostředí a c ... rychlost šíření vln, jak uvádí ISO 3741.

2.2.3 Aktivní a reaktivní zvuková pole

Šíření zvuku vyžaduje tok energie – ovšem můžeme zaznamenat přítomnost tlaku i v případě, že k žádnému šíření nedochází. *Aktivní pole* je takové, ve kterém se vyskytuje tok energie. Tok energie se naopak nevyskytuje v ryze *reaktivním poli*. V nějakém okamžiku může být energie expandována, ale vždy je vrácena zpět v okamžiku pozdějším – energie je uložena podobným způsobem jako v pružině. Z toho důvodu je výsledná intenzita nulová. Obecně vzato, zvukové pole bude mít obě komponenty – aktivní i reaktivní. Měření tlaku za účelem získání akustického výkonu v polích, která nejsou jednoznačně definována, může být (na rozdíl od intenzitního měření) nespolehlivé, protože reaktivní část nijak nesouvisí s vyzařovaným výkonem. V další části textu jsou pro ilustraci uvedeny dva případy reaktivních polí.

2.2.4 Stálé vlny v potrubí

Uvažujme píst, excitující vzduch na jedné straně trubky. Na druhé straně je zakončení, způsobující odrazy zvukových vln. Kombinace zpředu postupujících a odražených vln zapříčiňuje vznik maximálních a minimálních hodnot tlaku, které se vyskytují na pevně stanovených pozicích podél trubky. Pokud je zakončení zcela pevné, všechna energie je odrážena a výsledná intenzita je nulová. Intenzita může být

naměřena jen v případě absorbčního zakončení. Stálé vlny jsou přítomny v místnostech na nízkých frekvencích.

2.2.5 Pole blízké zdroji (near field, blízké pole)

Velmi blízko zdroji vystupuje vzduch jako pružinový systém, který zachovává energii. Energie cirkuluje bez vyzařování v oblasti, kterou nazýváme *blízkým polem*. Zde mohou být prováděna pouze intenzitní měření pro stanovení akustického výkonu. Velkou výhodou je možnost měření ve velmi malé vzdálenosti od zdroje, což má za následek zlepšení koeficientu *SNR* (*signal-to-noise-ratio*, odstup signálu od šumu).

2.3 Měření akustické intenzity

Nutnost měření akustického výkonu je velmi dobře známa a akceptována. Velmi dlouhou dobu byla ale přijímána v inženýrských oblastech pomalu, a to z důvodu nepřístupné ceny měřících zařízení. Výstavba a především vybavení testovacích komor je i pro středně velké prosperující podniky nákladná, nicméně v posledních desetiletích se objevilo vhodné řešení, které eliminuje výše nastíněné problémy – měření pomocí akustické intenzity. Nejen, že nevyžaduje ke svému provozu testovací odhlučňovou komoru, ale dovoluje provádět měření přímo v provozních podmínkách – za přítomnosti okolního hluku, popřípadě měření v blízkém poli. Zavádění tohoto způsobu měření je pomalé, ale pořizovací náklady měřícího zařízení jsou podstatně nižší, než je tomu u testovacích komor s veškerým příslušenstvím.

Nynější standardy obsahují směrnice pro určování akustického výkonu pomocí akustické intenzity (v minulosti připouštěly pouze určení pomocí hladin akustického tlaku). Jedná se o normu ČSN ISO 9614.

Velkou výhodou používání akustické intenzity k měření celkového akustického výkonu (namísto v minulosti používaných tlakových měření) je fakt, že trvalý okolní hluk neznemožňuje měřící proces. To proto, že intenzita je veličina vektorová – jestliže příspěvek externího hluku je pozitivní na jedné ploše, je negativní na ploše protější. Vnější zdroj hluku musí být stálý, jinak by mohlo docházet k chybám při celkovém součtu výkonu – to při rozdělení měření do několika ploch, kdy se nežádoucí hluk,

který ovlivní měření na jedné straně (ploše), nemusí rovnat hluku na straně protější. Nejběžnější zdroje zvuku jsou však stálé – například hluk klimatizace nebo větráku na základní desce PC.

Na rozdíl od tlaku, měřeného přímo mikrofonom, musí být intenzita zvuku vypočítána tzv. „in real-time“ (termín, označující proces, probíhající v daném reálném okamžiku), a to z měření tlaku a rychlosti částic. Snímač pro intenzitní měření se nazývá *intenzitní sonda* a prostředek pro vlastní výpočet *analyzátor intenzity zvuku*.

2.3.1 Intenzitní sonda

Snímač, nejčastěji užívaný pro intenzitní měření, je sonda se dvěma mikrofony, umístěnými v jedné ose s membránami směrem k sobě (tzv. „face-to-face“). Mikrofony intenzitní sondy musí být schopny měřit intenzitu v požadovaném frekvenčním rozsahu, navíc mechanická zařízení sondy by neměla ovlivňovat zvukové pole. Aby byla splněna norma, obsažená ve standardu IEC 1043, sonda musí používat vysoce kvalitní, fázově vyrovnané, kondenzátorové mikrofony pro volná pole. Pro frekvenční rozsahy od 50 Hz do 6300 Hz se používají ½ palcové mikrofónové páry, pro měření nad 10 kHz lze použít pár ¼ palcových mikrofónů. Pro zajištění dynamické způsobilosti měření musí být sonda schopna využít různých vzdáleností mezi mikrofony. V praxi se setkáváme s rozmezím 6 až 50 mm. Obecně platí, že větší vzdálenosti jsou vhodné pro měření nižších frekvencí.

Jak bude dále uvedeno, kvalita mikrofónů, vyrovnaní jejich fáze (sfázování) a vhodná volba mezery mezi mikrofony hrají klíčovou roli při definování frekvenčních rozsahů a akustických zařízení, které zpřesňují měření.

2.3.2 Analyzátor intenzity hluku

Analyzátor intenzity hluku představuje nástroj pro diagnostiku signálů a vyhodnocování jejich spekter. U komplexního systému pro měření intenzity jsou vyhodnocována frekvenční spektra, zde navrhovaný systém využívá analyzátor s konstantní relativní šířkou pásma (*CPB – constant percentage bandwidth*).

Vzdálenost středních frekvencí sousedních pásem je volena jedna oktáva (zdvojnásobení kmitočtu) nebo zlomek oktávy, daný číslem ve jmenovateli, n . Střed

a mezní frekvence sousedních pásem se liší o násobek $\sqrt[n]{2}$. Spektra s odstupem středních frekvencí, který je dán zlomkem $\frac{1}{n}$, jsou označována jako 1/n-oktávová spektra, přičemž n je voleno nejčastěji 1, 3, 6, 12, 24.

Logaritmická stupnice pro frekvenci u CPB analyzátorů dává při znázornění v grafu konstantní rozmístění jednotlivých složek spektra, což je kromě oblasti akustických měření výhodné i při měření vibrací a splňuje požadavky hygienických norem.

Intenzitní sonda spolu s analyzátozem intenzity hluku poskytují dva základní údaje, nezbytné pro určení akustické intenzity, a to *akustický tlak* a *rychlost částic*.

2.3.3 Výpočet akustické intenzity z hodnot tlaku a rychlosti

Intenzita je rovna toku energie jednotkou plochy. Protože výkon je roven síle, násobené rychlostí v daném směru, platí vztah:

$$I = \frac{W}{A} = \frac{F \times v}{A},$$

$$I = \frac{F}{A} \times v = P \times v,$$

kde I ... intenzita, W ... výkon, A ... plocha, F ... síla, v ... rychlost, P ... tlak.

Protože rychlost je vektorová veličina a tlak skalár, intenzita musí být ve výsledku vektor. Tedy správný zápis má potom tvar:

$$\vec{I} = P \times \vec{v}.$$

Vektor rychlosti, tedy i vektor intenzity, má tři složky I_x , I_y , I_z . Měřená intenzita je skalárním součinem aktuálního vektoru intenzity a směru hlavní osy sondy:

$$I_{\text{měřená}} = (I_x, I_y, I_z) \bullet \vec{A}_{\text{sondy}},$$

Při měření je nutné dodržovat směr kolmý k měřené ploše – to může být problematické u nepravidelných nebo zaoblených částí měřených objektů (ploch).

Nejmarkantnějším technickým problémem akustické intenzity je měření rychlosti. Nejvyužívanější metodou je technika tlakových rozdílů. Z pohybových rovnic – vztah mezi rychlostí a rozdílem tlaků může být nalezen tak, že rychlost je vypočítána z tlakového rozdílu mezi dvěma mikrofony.

Intenzita ve směru sondy je pak dána vztahem:

$$I_{sondy} = P \times v_{sondy},$$

kde v_{sondy} je rychlost ve směru hlavní osy měřící sondy.

Podobně jako v meteorologii, kde platí, že vítr vane, pokud se vyskytuje tlakový rozdíl mezi dvěma lokacemi, platí v akustice, že tlakový rozdíl způsobuje zrychlení molekul vzduchu. Newtonův druhý zákon dává do relace tlak, hustotu a rychlost změny rychlosti (zrychlení):

$$-\frac{\partial P}{\partial x}(x,t) = \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t}(x,t),$$

kde ρ_0 ... hustota vzduchu, $\frac{\partial P}{\partial x}(x,t)$... gradient tlaku, $\frac{\partial v}{\partial t}(x,t)$... zrychlení.

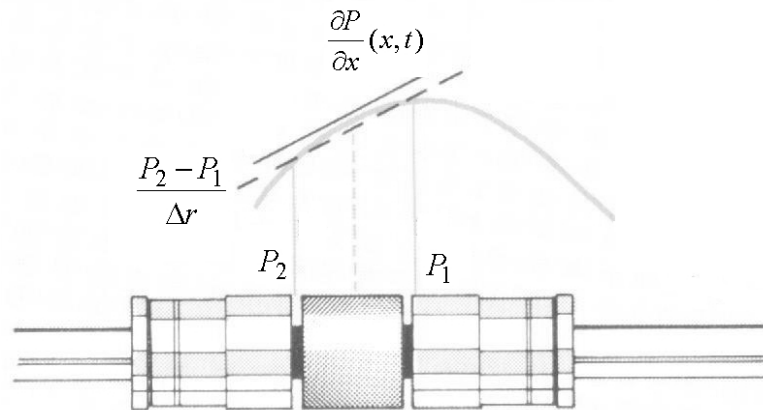
Tedy pro vyjádření zrychlení platí:

$$\frac{\partial v}{\partial t}(x,t) = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x}(x,t).$$

Pro intenzitní sondu (viz obrázek 2.1) je gradient tlaku $\frac{\partial P}{\partial x}(x,t)$ nahrazen následující rovností:

$$\frac{\partial P}{\partial x}(x,t) \cong \frac{P_2 - P_1}{\Delta r},$$

kde Δr ... mezera mezi mikrofony, P_2, P_1 ... tlak v místě mikrofonu 1, 2.



Obrázek 2.1: Aproximace gradientu tlaku, snímaného intenzitní sondou

Protože rychlost je integrálem zrychlení, tedy:

$$v = \int_0^t \frac{\partial v}{\partial t}(x,t) dt,$$

pro intenzitní sondu platí:

$$v = -\frac{1}{\rho_0} \int_0^t \frac{P_2 - P_1}{\Delta r} dt.$$

Tato rovnost reprezentuje měření akustické rychlosti v bodě uprostřed mezery mikrofonového páru intenzitní sondy. Rovnice pro tlak v témže bodě je zřejmá:

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2},$$

rovnice pro výpočet akustické intenzity, měřené ve směru hlavní osy intenzitní sondy, může být poté vypočítána následovně:

$$I_{sondy} = P \times v_{sondy} = \left\{ \frac{P_1 + P_2}{2} \right\} \times -\frac{1}{\rho_0} \int_0^t \frac{P_2 - P_1}{\Delta r} dt,$$

$$I_{sondy} = -\frac{P_2 + P_1}{2\rho_0\Delta r} \int_0^t (P_2 - P_1) dt \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]. \quad (2.4)$$

Toto je algoritmus, používaný v real-timeových analyzátorech k výpočtu okamžité intenzity ze dvou současných měření tlaku – zároveň je určen i směr šíření akustické intenzity (z místa s vyšší hodnotou tlaku k místu s hodnotou nižší).

2.3.4 Intenzitní měření pro stanovení akustického výkonu (norma ČSN ISO 9614)

Norma ČSN ISO 9614 obsahuje praktické postupy intenzitních měření, užívané pro stanovení akustického výkonu. Tato měření vychází z vektorově uvažovaného vztahu:

$$W = \int_S I \cdot n \cdot dS = \int_S I_n \cdot dS \quad [\text{W}], \quad (2.5)$$

kde n ... jednotkový vektor kolmý k ploše S , I_n ... orientovaná velikost normálové složky vektoru intenzity.

Výhoda tohoto tvaru plošného integrálu je zřejmá, neboť obvyklá sonda měří pouze složku intenzity ve směru své osy. Intenzitní sondou lze měřit pouze v jednom bodě prostoru, a proto byly vyvinuty dva postupy (uvedené v normě), umožňující odhad integrálu v uvedeném vztahu. První z nich se zabývá metodou měření v bodech, druhý metodou skanováním. Protože systém měření, který je náplní diplomové práce, využívá

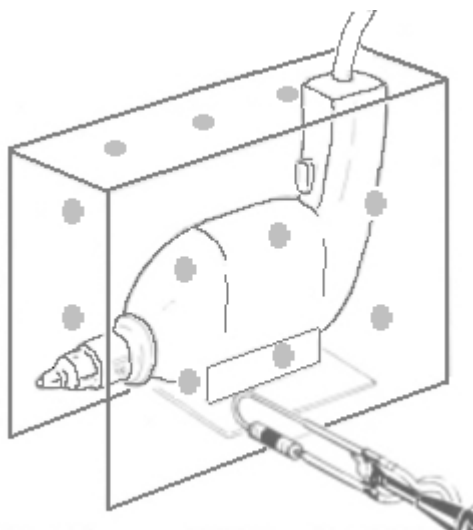
pouze první z obou metod, bude zde metoda skanováním nastíněna pouze rámcově.

2.3.4.1 Metoda měření v bodech (ČSN ISO 9614-1)

Metoda spočívá v rozdělení měřicí plochy na n částí s plochou S_i . Uprostřed každé plošky S_i se změří odpovídající intenzita I_{ni} kolmo k této plošce. Akustický výkon je pak stanoven jako součet všech příspěvků:

$$W = \sum_{i=1}^n I_{ni} \cdot S_i \quad [\text{W}]. \quad (2.6)$$

Praktická měřicí plocha by měla mít jednoduchý tvar – volí se zejména kvádry, avšak pokud to tvar měřeného tělesa vyžaduje, tak i válcové či kulové plochy. Pro komplikované zdroje je možné vzít v úvahu i soustavu takovýchto ploch, neboť zejména při měření s vysokou hladinou hluku pozadí je výhodné nevzdalovat se příliš blízkému poli.



Obrázek 2.2: Metoda měření v bodech

Norma předepisuje průměrnou vzdálenost mezi měřicí plochou a povrchem zařízení větší než 0,5 m. Požadavek souvisí s cirkulací zvukové energie a vzájemnou interferencí signálů, která se vyskytuje v blízkém poli. Nicméně ze vztahu pro stanovení výkonu vyplývá, že je možno měřit i v blízkém poli, kde však narůstá chyba měření, způsobená nedokonalostí měřicího systému.

Vlastnosti zvukového pole, na kterých je nemalou měrou závislé zatížení měření

chybami, jsou v normě ČSN ISO 9614 specifikována jako *indikátory zvukového pole*. Pro určení přesnosti výsledků při metodě měření v bodech se používají čtyři indikátory. Jednak je to *indikátor časové variability* zvukového pole F_1 , definován vztahem:

$$F_1 = \frac{1}{I_{ns}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (I_{nk} - I_{ns})^2},$$

kde I_{ns} ... střední hodnota I_n z n krátkých časových vzorků I_{nk} , vypočítaná jejich zprůměrováním. Počet vzorků se obvykle volí 10 a doba průměrování od 8 do 12 s. Tento indikátor má charakterizovat celé akustické pole včetně vnějších rušivých zdrojů. Velmi důležitý, ne-li rozhodující, je *indikátor akustický tlak-akustická intenzita* F_2 na měřící ploše, definovaný vztahem:

$$F_2 = L_{ps} - L_{|In|s},$$

kde L_{ps} je střední hodnota akustického tlaku na celé měřící ploše, vypočítaná z následující rovnice:

$$L_{ps} = 10 \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n 10^{L_{pi}/10} \right)$$

a $L_{|In|s}$... střední hodnota akustické intenzity na celé měřící ploše, vypočtená podle vztahu:

$$L_{|In|s} = 10 \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|I_{ni}|}{I_0} \right),$$

kde $|I_{ni}|$... normálová složka intenzity bez znaménka (tzn. pouze velikost, bez ohledu na směr toku zvukové energie). Indikátor F_2 může dosahovat velkých hodnot v difúzním poli, obsahujícím stojaté vlny, nebo v některém blízkém poli. Indikátor F_2 je doplněn o *indikátor záporného dílčího akustického výkonu* F_3 , definovaný jako:

$$F_3 = L_{ps} - L_{Ins},$$

kde L_{Ins} ... střední hladina normálové složky akustické intenzity včetně znaménka (tzn. bere se v úvahu, že energie může téci směrem ven nebo směrem dovnitř), definovaná vztahem:

$$L_{Ins} = 10 \log \left| \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{I_{ni}}{I_0} \right|.$$

V tomto vyjádření je použita normálová složka intenzity včetně znaménka I_{ni} ,

kteřá nabývá záporných hodnot v případě, že zvuková energie teče dovnitř měřicí plochy v daném bodě. Velká hodnota tohoto indikátoru signalizuje především existenci významných zdrojů hlukového pozadí a absorpci uvnitř měřené plochy.

Rozdíl indikátorů F_3-F_2 dosahuje větších hodnot většinou z důvodu působení vnějších zdrojů, nenulovou hodnotu může mít i při měření v blízkém poli. Při měření v souladu s normou ČSN ISO 9614-1 nesmí tento rozdíl převýšit 3 dB.

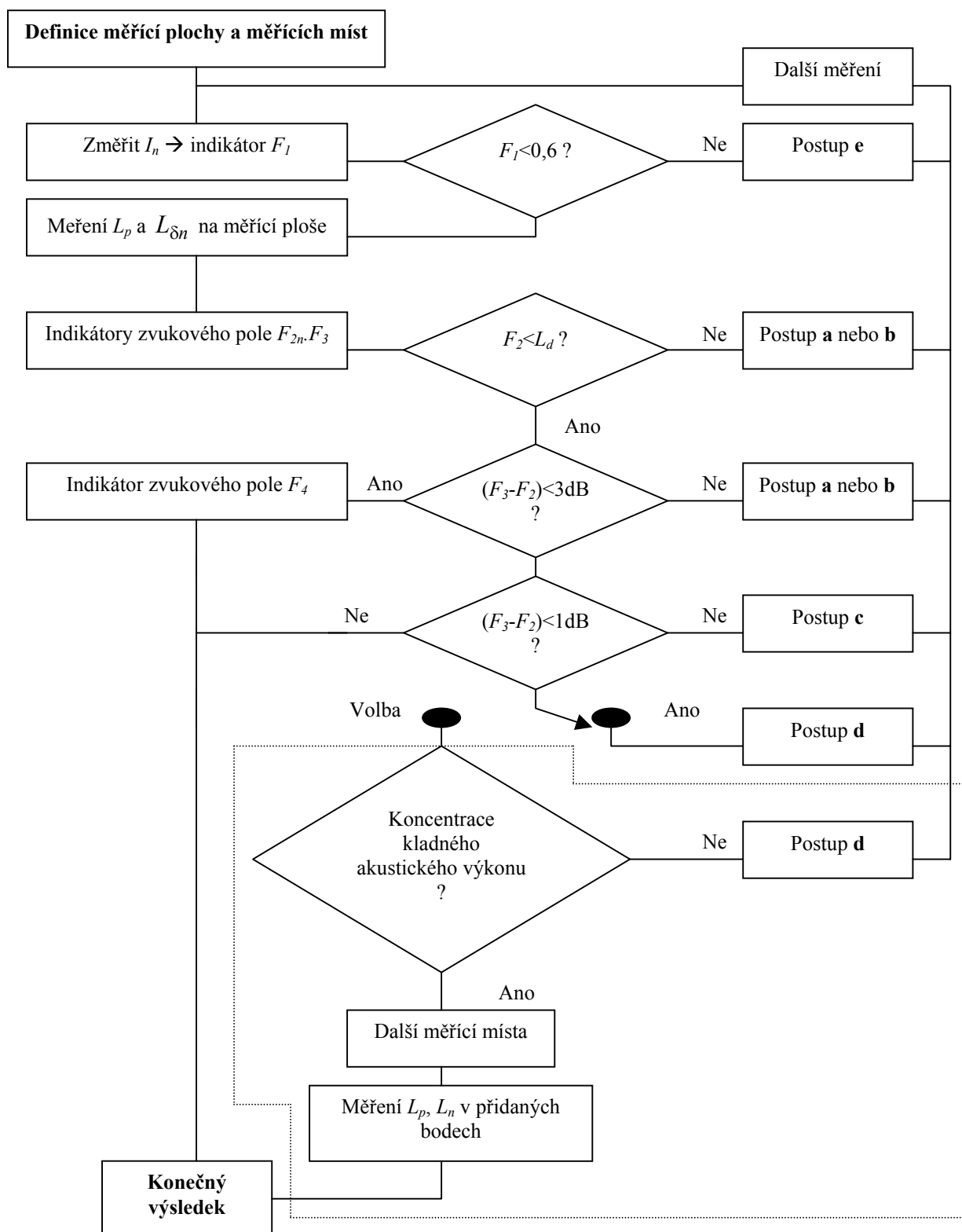
Je zřejmé, že při měření akustického výkonu pomocí intenzity potřebujeme vyjádřit směr toku energie. Pracujeme-li s intenzitou, považujeme směr vnější normály za kladný, tedy teče-li v nějaké oblasti energie dovnitř, bude intenzita záporná. V hladinovém vyjádření se pro znázornění záporného toku energie používá znaménko mínus před uvedenou decibelovou hodnotou, tedy (-) xxx dB.

Čtvrtým indikátorem, používaným při měření akustického výkonu v bodech, je *indikátor nerovnoměrnosti zvukového pole* F_4 , definovaný jako:

$$F_4 = \sqrt{\frac{1}{I_{ns}} \cdot \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_{ni} - I_{ns})^2},$$

kde I_{ns} ... střední hodnota normálové složky akustické intenzity určená zprůměrováním hodnot I_{ni} . Indikátor F_4 nabývá velkých hodnot v případě, kdy se hladiny akustické intenzity od sebe v jednotlivých bodech značně liší. Jedná se o typickou vlastnost směrových zdrojů. Indikátor F_4 se používá k určení, zda počet bodů na měřicí ploše je dostatečný.

Na obrázku 2.3 je znázorněno schéma měření v souladu s normou ČSN ISO 9614-1. Postupy, vedoucí ke zpřesnění měření, jsou uvedeny v tabulce 2.1. Veličina L_d se nazývá *index dynamické schopnosti*, charakterizuje měřicího řetězce a určuje se při ověřování měřicího přístroje a fázové kalibraci na základě indexu zbytkové intenzity δ_{p10} . Ten se stanoví jako rozdíl hladiny akustického tlaku a hladiny akustické intenzity naměřených sondou orientovanou ve zvukovém poli tak, že se akustická intenzita blíží k nule (tj. například v poli rovinných vln, je-li osa sondy kolmá na směr šíření vln). Hodnoty indexu zbytkové intenzity pro jednotlivé třídy přesnosti jsou součástí normy ČSN EN 61043 a pohybují se kolem 20 dB. Index dynamické schopnosti L_d je pak dán jako rozdíl indexu zbytkové intenzity a korekčního faktoru (jeho hodnota je pro třídy 1 a 2 stanovena na 10 dB a pro provozní měřidla, tzn. pro třídu 3, na 7 dB).



Obrázek 2.3: Schéma postupu pro zvýšení přesnosti při měření v bodech

Tabulka 2.1: Postupy, použité pro zvýšení přesnosti určení akustického výkonu měřením v bodech

Kritérium	Typ	Postup
Kritérium 1 $F_1 > 0,6$	e	Užijte postup k omezení kolísání akustické intenzity vnějších zdrojů nebo měřte v průběhu periody s menší variabilitou nebo prodlužte dobu měření v každém měřicím místě.
Kritérium 2 $F_2 > L_d$ nebo $(F_3 - F_2) > 3 \text{ dB}$	a	V přítomnosti významných vnějších zdrojů nebo dlouhé doby dozvuku zmenšete průměrnou vzdálenost měřicí plochy od zdroje, ne však blíže než 0,25 m. V nepřítomnosti významných vnějších zdrojů nebo dlouhé doby dozvuku zvětšete průměrnou vzdálenost měřicí plochy na 1 m.
Kritérium 2 není splněno a $1 \text{ dB} \leq (F_3 - F_2) \leq 3 \text{ dB}$	nebo b	Zastiňte měřicí plochu od vnějších zdrojů, nebo omezte přímé odrazy zvuku.
	c	Zvyšte rovnoměrně hustotu měřicích bodů tak, aby bylo vyhověno kritériu 2.
Kritérium 2 není splněno a $(F_3 - F_2) \leq 1 \text{ dB}$, volitelný postup selhal	d	Zvětšete průměrnou vzdálenost měřicí plochy od zdroje a využijte stejného počtu měřicích bodů nebo zvyšte počet měřicích bodů na měřicí ploše

2.3.4.2 Metoda skanováním (ČSN ISO 9614-2)

Metoda skanováním je založena na snímání vzorků sondou, která se spojitě pohybuje po dráze, umístěné na měřicí ploše. Za předpokladu stacionárního zvukového pole platí:

$$W = b \cdot \int_l I_n dl \quad [\text{W}], \quad (2.7)$$

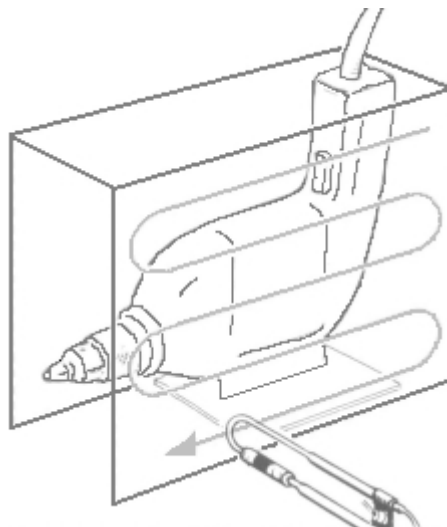
kde b ... šířka pásu, odpovídající dráze l ($dS \approx b \cdot dl$), po které se pohybuje sonda. Předpokládá se tedy, že plocha S je rozdělena pásy s konstantní šířkou. Je-li navíc rychlost sondy konstantní, lze rovnici dále upravit:

$$W \approx b \cdot \int_0^L I_n dl = b \cdot \int_0^T I_n(l) \frac{dl}{dt} dt = S \frac{1}{T} \int_0^T I_n(t) dt,$$

kde $I_n(t)$ představuje normálovou složku akustické intenzity, která je funkcí času díky pohybu sondy prostorem.

Také při této metodě měření je obvyklé vytvoření měřicí plochy, která obklopuje zdroj zvuku, podobně jako při měření v bodech. Zde se jako nejvhodnější jeví plochy, složené ze čtvercových a obdélníkových součástí, neboť z aproximačních vztahů

vyplývá, že je nutné zajistit rovnoměrné pokrytí měřicími dráhami. Každé měření se opakuje pro dvě navzájem kolmé orientace rovných úseků dráhy. Sondou lze po dráze pohybovat buď ručně (doporučená rychlost pohybu je podle normy 0,1 až 0,5 m.s⁻¹) nebo speciálním mechanismem, pro který se doporučuje rychlost menší než 1 m.s⁻¹.



Obrázek 2.4: Metoda skanováním

Jednotlivé indikátory, podle nichž se lze orientovat při samotném měření, zde nebudou uvedeny, a to z již výše zmíněných důvodů – systém měření, navrhovaný v diplomové práci, využívá metodu měření v bodech.

2.3.5 Chyby intenzitních měření

Získání přesných výsledků měření intenzity vyžaduje znalost limitů sondy a analyzátoru. Protože sonda měří dvě veličiny současně – rychlost a tlak, jde o měření složitější, než je samostatné měření tlaku. Znalost všech omezení pomáhá eliminovat chyby, které se mohou během procesu vyskytnout.

2.3.5.1 Chyba při měření vysokých frekvencí

Při měření vysokých frekvencí se bohužel můžeme setkat hned s několika zdroji možných chyb – fyzikální důsledky mikrofону, ochranná mřížka, mikrofónová mezera a tělo sondy. Nejčastěji zastoupenou chybou je chyba aproximace. Ta ve skutečnosti zastupuje dvě chyby, a to nesprávný tlak a nesprávnou rychlost. Eliminace této chyby

vychází ze znalosti rovnice vlny, procházející mezerou. Intenzita ve středovém bodě, získaná z měření tlaku u dvou mikrofonů, je porovnávána s přesnou intenzitou ve středovém bodě získanou z rovnice tlaku. Z porovnání plyne, že chyba aproximace závisí na velikosti mezery mezi mikrofony a vlnové délce:

$$e_{sondy} = 10 \log \left(\frac{\sin \left(2\pi \frac{\Delta r}{\lambda} \right)}{2\pi \frac{\Delta r}{\lambda}} \right) \quad [\text{dB}], \quad (2.8)$$

kde Δr ... vzdálenost mezi mikrofony a λ ... vlnová délka.

Tento vztah se používá pro stanovení přípustných frekvenčních rozsahů pro danou vzdálenost mikrofonů. Pro chybu aproximace o velikosti 1 dB a méně je měření akceptovatelné na dané nebo nižší frekvenci podle tabulky 2.2 (viz níže). Jako hrubý odhad může sloužit skutečnost, že chyba bude 1 dB a méně, pokud vzájemný koeficient vzdálenosti mikrofonů a vlnové délky bude menší než 0,18.

2.3.5.2 Chyba při měření nízkých frekvencí

Jak bylo uvedeno výše, intenzita může být odvozena z odečtení dvou tlaků (P_1 a P_2) měřených sondou. Toto odvození však může být náchylné k vysokofrekvenčním chybám kvůli finálním rozdílovým aproximacím. Při nízkých frekvencích dochází k nepřesnostem i z dalšího důvodu – fázové neshodě. Tento jev se vyskytuje v jistých rozsazích u všech intenzitních analyzátorů a sond. Proto musí být při nízkých frekvencích sfázování pozorně specifikováno. Při nízkých frekvencích, kdy je vlnová délka relativně dlouhá vzhledem k velikosti mezery mezi mikrofony, bude fázový rozdíl mezi P_1 a P_2 malý. Ve skutečnosti, při velmi nízkých kmitočtech, bude rozdíl tak malý, že může být „překryt“ chybou fáze sondy nebo analyzátoru. Tento problém se může vyskytnout v přítomnosti reaktivní intenzity, kdy hladina akustického tlaku může být až 20 dB (i více) nad skutečnou hladinou intenzity. Souvislost intenzity, tlaku, kmitočtu a velikosti mezery demonstruje následující vztah:

$$I = \frac{P_{1rms} P_{2rms} \sin(\phi)}{2\pi f \rho_0 \Delta r} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}], \quad (2.9)$$

kde I ... intenzita, P_{1rms} , P_{2rms} ... tlak na mikrofону 1 a mikrofону 2, ϕ ... měřený fázový rozdíl mezi kanálem 1 a kanálem 2 na frekvenci f , ρ_0 ... hustota, Δr ... velikost mezery.

Při nízkých frekvencích, kdy je tlak na obou mikrofonech téměř identický, můžeme vzorec zjednodušit na tvar:

$$I = \frac{P_{rms}^2 \sin(\phi)}{2\pi f \rho_0 \Delta r}.$$

Převod hladiny akustického tlaku (*SPL* – *sound pressure level*) na intenzitu je nazýván *P-I index* (*pressure-intensity index* – zmíněn již v kapitole 2.1) a je dobrým ukazatelem akustických zařízení. Měření s vysokými P-I indexy jsou složitější, protože změna fáze napříč mezerou sondy se zmenšuje se zvýšením indexu. To je zřejmé po další úpravě vzorce:

$$\sin(\phi) = \frac{2\pi f \rho_0 \Delta r}{\frac{P_{rms}^2}{I}}.$$

Hladiny akustického tlaku a akustické intenzity jsou definovány následovně:

$$L_P = SPL = 10 \log \frac{P_{rms}^2}{P_0^2},$$

kde $P_0 = 20 \mu Pa$,

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0},$$

kde $I_0 = 10^{-12} W$,

tedy P-I index může být definován následně:

$$L_{PI} = L_P - L_I = 10 \log \left(\frac{\frac{P_{rms}^2}{P_0^2}}{\frac{I}{I_0}} \right) = 10 \log \left(\frac{P_{rms}^2}{I} \frac{I_0}{P_0^2} \right) \quad [dB], \quad (2.10)$$

$$\frac{P_{rms}^2}{I} = \frac{P_0^2}{I_0} 10^{\frac{L_{PI}}{10}}.$$

kde L_P ... hladina tlaku, L_I ... hladina intenzity.

Vyjádření pro fázový úhel:

$$\sin(\phi) = \frac{2\pi \rho_0 I_0}{\rho_0^2} \frac{f \Delta r}{10^{L_{PI}/10}}.$$

Vzorec ukazuje, že měřený fázový úhel je úměrný frekvenci a velikosti mezery a inverzně úměrný P-I indexu. Pro velké hodnoty P-I indexu se tedy fázová změna

snižuje, a to až k úrovni fázového nevyvážení aparatury. Proto jsou měření v reaktivním prostředí náročná na kalibraci.

2.3.5.3 Problémy měření malých změn fáze

Při vysokém P-I indexu, speciálně přes 10 dB, je změna fáze u sondové mezery malá. To by nebyl problém v případě, kdy má intenzitní sonda a analyzátor fázovou přesnost, která je mnohem menší, než měřená fázová změna. To bohužel není běžný případ. Nejlepší intenzitní analyzátory mají fázovou přesnost $\pm 0,2^\circ$ a nejlepší intenzitní sondy $\pm 0,05^\circ$. Je zřejmé, že fázové přesnosti jsou limitujícím faktorem při měření intenzity na nízkých frekvencích (kde velikost mezery je malá vzhledem k vlnové délce) nebo v reaktivních prostředích (kde je P-I index vysoký).

2.3.5.4 Reziduální intenzita

Jestliže je intenzitní sonda umístěná ve zcela reaktivním prostředí, kde jsou oba mikrofony vystaveny identickému tlaku se stejnou fází, může se stát, že intenzitní sonda ukazuje nulovou intenzitu. Ale odečtení nulové intenzity je teoreticky nemožné, z důvodu zbytkové fázové změny mezi mikrofony u sondy. Intenzitní analyzátor indikuje nějakou zbytkovou intenzitu – tzn. fázový posun mezi sondou a analyzátozem, nikoliv intenzitu zvukového pole. Tento zbytek se nazývá reziduální intenzita. Hladina reziduální intenzity se zvyšuje společně s reaktivním tlakem – je tedy vhodné odvolat se na vztah pro zbytkový, reziduální *P-I index* (L_{RPI}). Tento vztah definuje frekvenční rozsah, ve kterém je možné provádět měření.

2.3.5.5 Normy fázové přesnosti intenzitních analyzátorů

IEC 1043 je mezinárodní standard, který specifikuje přesné požadavky pro intenzitní sondy a analyzátory. Místo přímé specifikace fázové přesnosti definuje minimální reziduální P-I index vzhledem k frekvenci. Protože většina analyzátorů specifikuje fázovou přesnost, nikoliv reziduální P-I index, je užitečné znát převodní vztah mezi oběma veličinami. Předpokládejme, že fázový úhel intenzitního měření má

chybu rovnou $\pm\theta_e$, kde $\pm\theta_e$ je fázová přesnost měřicího systému. Je možné ukázat, že θ_e přímo souvisí s L_{RPI} . Protože zbytkový tlak je měřen právě tehdy, když je fázový úhel mezi dvěma mikrofony právě nulový, je tedy indikovaná intenzita jenom reziduální:

$$I = \frac{P_{rms}^2 \sin(\phi + \theta_e)}{2\pi f \rho_0 \Delta r},$$

a jestliže $\phi = 0$:

$$I_{reziduální} = \frac{P_{rms}^2 \sin(\theta_e)}{2\pi f \rho_0 \Delta r},$$

reziduální P-I index, založený na θ_e , je:

$$L_{RPI} = 10 \log \left(\frac{\frac{P_{rms}}{P_0^2}}{\frac{I_{reziduální}}{I_0}} \right) = 10 \log \left(\frac{2\pi \rho_0 I_0}{P_0^2} \frac{f \Delta r}{\sin(\theta_e)} \right) \quad [\text{dB}]. \quad (2.11)$$

Je-li typickou hodnotou $\theta_e = \pm 0,15^\circ$ (pro systém na 100 Hz, s mezerou 12mm), L_{RPI} potom bude:

$$L_{RPI} = 10 \log \left(\frac{2\pi \rho_0 I_0}{P_0^2} \frac{f \Delta r}{\sin(\theta_e)} \right) = 10 \log \left(\frac{2\pi (1,29)(10^{-12})}{(20 \cdot 10^{-6})^2} \frac{100(12/1000)}{\sin(0,15^\circ)} \right) = 9,7 \text{ dB}.$$

2.3.5.6 Chyba intenzitního měření způsobená fázovou změnou

Znalost reziduálního P-I indexu akustické intenzity měřeného systému znamená, že je známa dynamická způsobilost systému. Intenzita, která je menší než reziduální, nemůže být rozlišena od fázové změny analyzátoru a proto nemůže být ani měřena. Reziduální intenzita je závislá na tlaku, a tak v reaktivním prostředí, kde je tlak vysoký, je reziduální intenzita rovněž vysoká. Tato skutečnost stanovuje spodní limit přesnosti intenzitního měření a tudíž omezuje akceptovatelný rozsah P-I indexů.

Pro určení akceptovatelných P-I rozsahů, založených na znalosti L_{RPI} , je vypočtena chyba intenzity, zapříčiněná fázovou změnou. Protože chyba intenzity je rozdíl mezi intenzitou skutečnou a intenzitou, změřenou s nedokonalou sondou

a analyzátořem, je tato chyba funkcí L_{PI} a L_{RPI} .

Pro malé fázové úhly, kde $\sin(\phi) = \phi$, bude mít vztah mezi P-I indexem a fázovým úhlem tvar:

$$\begin{aligned}\theta_e &= \frac{2\pi\rho_0 I_0}{P_0^2} \frac{f\Delta r}{10^{L_{RPI}/10}}, \\ \phi &= \frac{2\pi\rho_0 I_0}{P_0^2} \frac{f\Delta r}{10^{L_{PI}/10}}, \\ e_\theta &= 10\log\left(\frac{I_{\text{měřená}}}{I_{\text{skutečná}}}\right) = 10\log\left(\frac{\frac{P_{rms}^2 \sin(\phi + \theta_e)}{2\pi f \rho_0 \Delta r}}{\frac{P_{rms}^2 \sin(\phi)}{2\pi f \rho_0 \Delta r}}\right) = 10\log\left(\frac{\phi + \theta_e}{\phi}\right), \\ e_\theta &= 10\log\left(1 \pm \frac{\theta_e}{\phi}\right) = 10\log\left(1 \pm \frac{\frac{2\pi\rho_0 I_0}{P_0^2} \frac{f\Delta r}{10^{L_{RPI}/10}}}{\frac{2\pi\rho_0 I_0}{P_0^2} \frac{f\Delta r}{10^{L_{PI}/10}}}\right) = 10\log\left(1 \pm \frac{10^{L_{PI}/10}}{10^{L_{RPI}/10}}\right), \\ e_\theta &= 10\log\left(1 \pm 10^{[L_{PI} - L_{RPI}]/10}\right) \quad [\text{dB}].\end{aligned}\tag{2.12}$$

V praxi obecně platí, že dokud je intenzita o 7 dB větší než zbytkový hluk, můžeme očekávat chybu měření menší než 1 dB.

2.3.5.7 Chyba měření Off-Axis

Poslední zdroj chyb měření, který zde bude uveden, je způsoben chybným nasměrováním sondy. Intenzitní sonda, vyrobená v souladu s IEC 1043 má typickou charakteristiku off-axis odezvy, která vyplývá z kosinového vztahu:

$$\frac{I_\theta}{I_0} = 10\log[\cos\theta].$$

Abychom předešli chybám, musí být sonda při měření akustického výkonu nasměrována relativně kolmo k měřené ploše. Při vychýlení sondy o 10° se bude naměřená intenzita lišit od skutečné hodnoty pouze o 0,07 dB, což nepředstavuje problém významnějšího charakteru. Větší chyba může být způsobena intenzitou, která je kolmá k měřené ploše. Tato část intenzity by neměla přispívat k výpočtu akustického výkonu. Při sklonu 10° se pohybuje koeficient v rozsahu od 0 (pro $\theta = 90^\circ$) až do 0,17

(pro $\theta = 80^\circ$). To může způsobit nechtěné přispění off-axis zdroje hluku. Ačkoliv nula na 90-ti stupních může způsobit chybu při měření akustického výkonu, tato charakteristika je cenná při přesném určení zdroje hluku.

2.3.6 Základní konfigurace prostředků měření

Je namístě předeslat, že úspěšné měření akustického výkonu užitím intenzitní metody může být realizováno pouze v případě dostatečných znalostí prostředí – pokud provádíme měření v hlučném prostředí, musí být hluk stálý a fázová přesnost měřicího zařízení postačující. Následující procedury jsou založeny na úvahách a znalosti potencionálních chyb, tak jak bylo uvedeno výše.

2.3.6.1 Výběr vhodného frekvenčního rozsahu

Četné mezinárodní standardy vyžadují pro určení akustického výkonu měření v třetinooktávovém pásmu od 100 Hz do 6300 Hz. Ovšem v některých (smluvních) případech může být rozsah rozšířen nebo naopak zúžen z důvodu lepšího přizpůsobení měřeným objektům. Například hladina akustického výkonu velmi rozlehlého zařízení, jakým je hydrogenerátor, může obsahovat významné složky menší než 100 Hz – proto je možné upravit frekvenční rozsah měření na interval 50 Hz – 4000 Hz. Stejně tak může malá turbína obsahovat významné složky vyššího kmitočtu, než je 6300 Hz a proto bude v tomto případě měřicí interval 10 Hz – 10 kHz. Znalost požadovaného frekvenčního rozsahu je klíčová pro volbu sondy a analyzátoru.

Jestliže je frekvenční rozsah rozšířen na spodní hranici, dochází ke snížení dynamické způsobilosti sondy a analyzátoru (viz 2.3.5.2 *Chyby při nízkých frekvencích*). Při nízkých frekvencích je fázová změna při průchodu vlny mikrofonní mezerou malá a fázová přesnost ovlivňuje způsobilost měření. Tato situace se ještě zhorší v případě reaktivního prostředí. Tedy pro měření frekvencí nižších než 100 Hz je nutné použití kvalitnějších sond i analyzátorů. Navíc je vhodné zvolit větší mikrofonní mezeru a zkušební prostor by měl být tak blízko volnému poli, jak je to jen možné (kde je hladina L_{PI} menší než 5 dB). Při měření vyšších frekvencí, než je standardní rozsah, vyžaduje schopnost analyzátoru měřit „realtime“ do 10 kHz.

2.3.6.2 Volba distanční mezery

Po výběru frekvenčního rozsahu přichází na řadu volba vhodné mikrofonní mezery. Velikost mezery závisí na frekvenčním rozsahu, akustickém prostředí (L_{PI}) a celkové fázové změně sondy a analyzátoru. Nezřídka se stává, že je nezbytné použití dvou anebo více různých mezer pro tentýž test. Větší mezera nachází uplatnění na nižších frekvencích a menší mezera na vyšších. Při použití více mezer frekvenční rozsah zpravidla překrývá tři a více třetinooktávových pásem. Nejvyšší požadovaná testovací frekvence určuje, jak malá musí být mezera pro danou chybu aproximace (viz tabulku 2.2). Pro chybu aproximace menší než 1 dB má každá z uvedených mezer maximální frekvenci.

Tabulka 2.2: Velikost distanční mezery vzhledem k požadované chybě

Velikost mezery	Šířka pásma pro maximální chybu 1 dB
6 mm	10000 Hz
10 mm	6300 Hz
12 mm	5000 Hz
50 mm	1250 Hz

Nejnižší požadovaná testovací frekvence naopak určuje, jak musí být mezera velká. Jak bylo uvedeno výše, způsoblost pro nízké frekvence závisí na:

- velikosti mezery
- P-I indexu (L_{PI}) akustického prostředí
- fázové přesnosti sondy a analyzátoru
- požadované přesnosti

Chyba nízkých frekvencí při měření je funkcí momentálního posunu fáze tlaku (napříč mikrofonní mezerou) vzhledem k fázové přesnosti systému:

$$e_{\theta} = 10 \log \left(1 \pm \frac{\theta_e}{\phi} \right).$$

Tedy má-li být e_{θ} menší než ± 1 dB, bude platit:

$$\frac{\theta_e}{\phi} = 1 - 10^{e_{\theta}/10} = 1 - 10^{-1/10} = 0,206 = \frac{1}{4,86}.$$

Výsledkem je zjištění, že fázová změna napříč mezerou musí být minimálně 4,86 násobkem fázové přesnosti systému, abychom docílili chyby měření menší než 1 dB. Z tohoto vztahu lze určit minimální velikost mezery pro danou přesnost (1 dB),

akustické prostředí a frekvenci.

Z předchozích výsledků platí:

$$\phi = 4,86\theta_e,$$
$$\theta_e = \frac{2\pi\rho_0 I_0}{P_0^2} \frac{f\Delta r}{10^{L_{PI}/10}},$$

při omezení na malé fázové úhly.

Tedy pro přesnost, požadovanou směrem k dolní hranici frekvence specifického 1/3 oktanového pásma (faktor $2^{-1/6}$ od centrální frekvence) určíme mezeru výpočtem:

$$\Delta r = \frac{4,86\theta_e (2\pi / 360^\circ) P_0^2 10^{L_{PI}/10}}{2\pi\rho_0 I_0 (2^{-1/6} f)} = 4,7 \left(\frac{\theta_e 10^{L_{PI}/10}}{f} \right) \quad [\text{m}], \quad (2.13)$$

kde L_{PI} ... P-I index, f ... střední frekvence 1/3 oktanového pásma, θ_e ... chyba fáze použité sondy a analyzátoru.

2.3.7 Vizualizace výsledků měření akustické intenzity

V oblasti grafického zpracování výsledků intenzitních měření se setkáváme nejčastěji se dvěma způsoby zobrazování, a to s intenzitní mapou a s grafem, který představuje akustický výkon v třetinooktávových spektrech.

Intenzitní mapu, respektive jednu měřenou plochu objektu, tvoří konturový graf, kde jednotlivé barevné odstíny reprezentují příslušné hladiny intenzity. Tato zobrazení poskytují přehled o dílčích zdrojích hluku a jsou zároveň nástrojem pro jejich lokalizaci. Složky intenzity opačného směru (pokud se v měření vyskytují) mají záporné znaménko. Hustější síť měřených bodů samozřejmě znamená kvalitnější zobrazení.

Typ grafu, zobrazující výkon (v dB) v třetinooktávových spektrech, bývá většinou sloupcový a složky intenzity v opačném směru zde nejsou vykreslovány v záporných hodnotách. Jsou odlišovány jinou barvou a umístěvány společně s kladnými složkami intenzity na společnou osu.

2.4 Metodika měření na analyzátoru PULSE a sondě B&K 3599

V této části textu bude prezentována problematika práce s konkrétním zařízením, které je využíváno pro intenzitní měření a sběr dat. Jedná se o produkty firmy Brüel & Kjaer, multianalyzátor PULSE a intenzitní sondu B&K 3599.

2.4.1 Multianalyzátor PULSE

Multianalyzátor PULSE je analyzátor, založený na platformě osobního počítače. Je výsledkem vývoje jednoho z nejrozsáhlejších software v oblasti měření a analýzy hluku a vibrací.



Obrázek 2.5: Multianalyzátor PULSE 3560 C

Možnosti PULSE pracovat v reálném čase umožňují sledování výsledků měření a provádění příslušných analýz okamžitě po změření, což předznamenává snadnou kontrolu měření a dat a okamžité určení možných problémů. Ve spojení s automatizovaným vytvářením výsledných zpráv je PULSE nástrojem, který umožňuje velice rychlé získávání a vyhodnocování výsledků. Multianalýza řeší současně dva úkoly – vlastní měření a zpracování dat několika různými způsoby analýzy současně, např. FFT analýzou, 1/n oktávovou analýzou (CPB analýzou) nebo analýzou celkových úrovní. To vše na stejných nebo různých signálech (kanálech) současně, s možností zobrazování výsledků a přímého ukládání dat na disk. Všechny tyto vlastnosti snižují časy měření a zvyšují kvalitu měření a výsledků.

Použití PULSE pro měření hluku a vibrací (od kalibrace, sběru dat a analýzy až po vytváření výsledných zpráv a reportů) znamená zjednodušení celého měřicího procesu. Uživatelské rozhraní poskytuje jednoduché a logické ovládání filozofie

Windows. Podle požadavků lze pracovat jak s minimem informací, tak i se složitým nastavením měření. Všechny informace o nastavení a konfiguraci měření jsou ukládány do tzv. *projektů měření* a mohou být opakovaně použity pro další práci s analyzátozem. Technologie hardware PULSE umožňuje připojení snímačů všech vývojových typů, od těch nejstarších až po moderní zařízení. Stejně jako všechna ostatní nastavení může být i report vytvořen a zobrazen pomocí několika jednoduchých operací, bez nutné znalosti kompletní architektury rozhraní.

Software PULSE je modulární – to znamená, že uživatel má možnost přidat libovolný počet dostupných softwarových modulů pro další specifická měření a aplikace, jako jsou např. modul pro měření v závislosti na otáčkách nebo software pro kvalitu zvuku. Stejným způsobem lze přidávat také hardwarové moduly a rozšiřovat tak možnosti systému. Nicméně každý modul znamená nemalé finanční zatížení.

PULSE podporuje technologii OLE a jednotlivé měřicí kroky lze také upravit díky přístupnosti k nástrojům, jako jsou C++, Delphi, MATLAB, Visual Basic a další. Zmíněná technologie byla využita při tvorbě aplikace pro intenzitní měření, která pracuje s předem nakonfigurovaným projektem, obsahujícím potřebné nástroje pro analýzu a sběr dat. Tento projekt zůstává během měření neměnný a je spouštěn pouze po dobu samotného intenzitního měření a to jako skrytá aplikace, do níž uživatel vůbec nezasahuje.

2.4.1.1 Architektura a systém multianalyzátoru PULSE

Při startu projektu PULSE automaticky spouští příkaz pro detekci hardware (front-endu) a zároveň načítá informace o hardwaru do příslušných nástrojů (do tabulky nastavení hardwaru a konfiguračního organizátoru). Front-end je propojen s PC prostřednictvím ethernetového připojení.

Hardware PULSE je tvořen rámem, popřípadě rámy (3560 C, 3560 D, atd.), který obsahuje moduly pro úpravu signálů a sběr dat. Každý jednotlivý fyzický vstup na modulu je nazván kanálem s příslušným číslem. Signály jsou reprezentacemi fyzických vstupů, detekovaných na vstupních kanálech. Důležitým aspektem u PULSE je právě fakt, že zde existuje rozdíl mezi kanály a signály. *Kanál* reprezentuje měřicí řetězec od fyzického snímače (např. mikrofon nebo akcelerometr) přes fyzický konektor na front-endu PULSE až po software v PC. Zde je pouze jeden snímač a kanál na jeden

fyzický konektor na front-endu. *Signál* je reprezentací kanálu, který je v PULSE použit pro analýzu a zobrazení. Může existovat více signálů pro jeden kanál. Více signálů pro jeden kanál může být užitečné v případě odlišného digitálního zpracování signálu pro různé typy analýzy – například při různém vážení ve frekvenční oblasti (A, B, C, D) u dvou akustických signálů připojených na stejný kanál. Některé nastavované vlastnosti se týkají pouze jednotlivých signálů, zatímco jiné mohou být aplikovány na všechny signály připojené na kanál.

Vlastnosti, které mohou být nastavené u signálu:

- akustické vážení (*acoustic weighting*) – A, B, C, D
- integrace /derivace (*integration/differentiation*) (jednoduchá nebo dvojitá)
- časové vážení (*time weighting*) – vážení typu *Uniform, Hanning, Flat Top, Kaiser-Bessel, Transient* nebo *Exponential*
- vážení ve frekvenční doméně (*frequency weighting*) – $j\omega$, $j\omega^2$, 1, $1/j\omega$, $1/j\omega^2$

Vlastnosti, společné všem signálům, které jsou připojené na kanál:

- citlivost (*sensitivity*)
- přizpůsobení zesílení (vstupní konstanta) a ofset (*gain adjust and offset*)
- typ vstupu (*input source*)
- polarizační napětí (*polarization voltage*)
- maximální špičková hodnota na vstupu – vstupní rozsah (*max. peak input*)
- filtry (*filters*)
- zpoždění kanálu (*channel delay*)

Data procházejí systémem z fyzických kanálů za účelem zpracování a zobrazení. Proces může být zjednodušeně popsán následovně: Fyzický kanál má k sobě připojen jeden nebo více signálů, které jsou analyzovány. Výsledkem analýzy jsou funkce (např. autospektrum, čas, atd.). Tyto funkce mohou být poté zobrazeny nebo uloženy prostřednictvím uživatelského rozhraní PULSE, popřípadě exportovány v jednom z podporovaných formátů (nejčastěji jako text UNICODE).

Konfigurační organizátor zobrazuje stromovou strukturu všech dostupných jednotek, modulů a kanálů v systému PULSE. V konfiguračním organizátoru PULSE defaultně vkládá signál pro každý kanál v systému. Signály, které jsou zobrazeny

v konfiguračním organizátoru, jsou připojeny na analyzátory a jsou uspořádány ve skupinách (*groups*) v rámci organizátoru měření. PULSE používá signálové skupiny pro snadnější práci s velkým množstvím signálů.

Všechny informace pro provedení měření obsahují šablony měření v **organizátoru měření**. V organizátoru měření může být vytvořeno mnoho šablon, avšak v jednom okamžiku může být aktivní pouze jedna z nich. Šablona měření obsahuje tři hlavní komponenty, které jsou viditelné ve stromové struktuře organizátoru měření:

- frontend – konfigurace front-endu načtená z konfiguračního organizátoru nebo z příslušného souboru
- setup – nastavení měření včetně analyzátoru (nebo více analyzátorů) pro analýzu nebo měření včetně nastavení skupin signálů, které má analyzátor zpracovávat
- input(s) – naměřená data uložená ve vstupním bufferu (bufferech)

Ucelený pohled na data z konfiguračního organizátoru a z organizátoru měření, který přiřazuje fyzický hardware a kanály k příslušným snímačům a signálům, poskytuje **tabulka nastavení hardwaru**, která může být druhou variantou nastavení systému, kdy je celá konfigurace provedena v jedné tabulce a nikoliv v příslušných organizátorech. Jakékoliv připojené snímače, jako jsou mikrofony, akcelerometry a snímače síly, jsou v tabulce zobrazeny včetně jejich jednotlivých vlastností.

Po konfiguraci veškerého hardwaru lze nastavit analyzátor – v prostředí organizátoru měření se po vyvolání příslušné funkce objeví seznam přístrojů, ale použitelné jsou pouze ty z nich, na které má uživatel licenci a hardwarové zařízení. Analyzátory v organizátoru měření poskytují základní data časové a spektrální analýzy, pro následné zpracování dat v dalších funkcích, jako je frekvenční odezva, impulzní odezva, koherence atd. slouží **organizátor funkcí**. Jednotlivé funkce i jejich skupiny jsou vkládány a konfigurovány stejným způsobem, jako skupiny signálů a signály.

Pro zobrazení získaných a vyhodnocení dat slouží v systému PULSE 2-D, popřípadě 3-D grafy s řadou možností, od dílčích vykreslení spekter v průběhu měření až po celkové charakteristiky měřených signálů. Projekt, obsažený v systému

intenzitního měření v diplomové práci, žádný z dostupných typů zobrazení nevyužívá.

2.4.2 Akustická sonda B&K 3599

Akustická intenzitní sonda uvedeného typu obsahuje vyměnitelný mikrofónový pár (typu B&K 4197), orientovaný „face-to-face“ s volitelnou délkou distanční mezery 6 až 50 mm. Vhodné použití distančních mezer vzhledem k měřeným frekvenčním rozsahům udává tabulka 2.3.

Tabulka 2.3: Velikost distanční mezery vzhledem k frekvenčnímu rozsahu měření

Velikost mezery	Frekvenční rozsah měření
8,5 mm	250 Hz – 6,3 kHz
12 mm	250 Hz – 5 kHz
50 mm	20 Hz – 1,25 kHz

Nespornou výhodou sondy 3599 oproti ostatním typům je dálkové ovládání. Některé z jeho prvků využívá uživatelská aplikace, popsaná v druhé části práce.



Obrázek 2.6: Akustická sonda B&K 3599

3. Praktická část

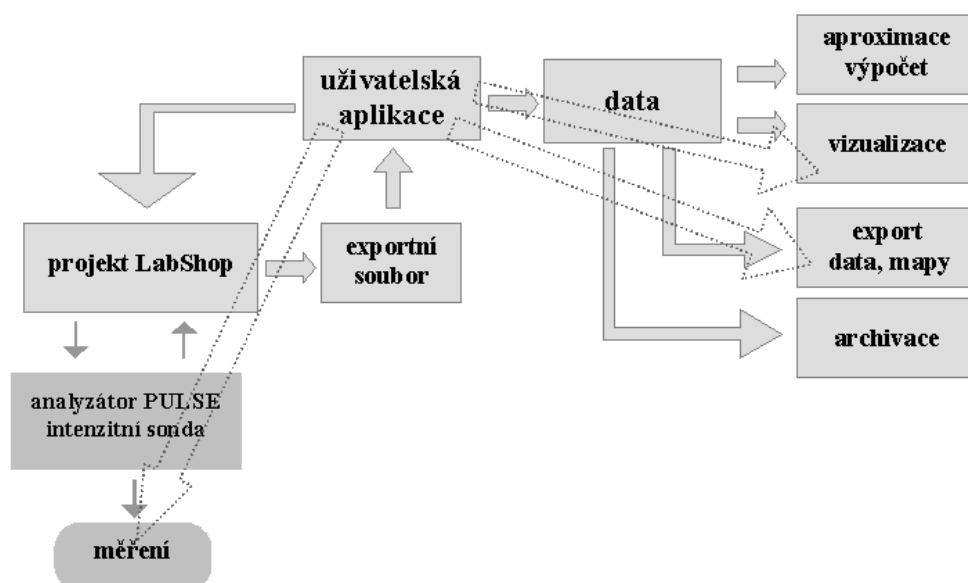
Obsahem třetí části práce jsou navrhovaná zlepšení měřicího procesu a jejich realizace spolu s praktickým ověřením.

3.1 Návrh zlepšení metodiky měření a realizace navržených úprav

Jako stěžejní úkoly diplomové práce byly stanoveny body č. 3 a 4 zadání, tedy návrh zlepšení metodiky měření akustické intenzity, a to zejména v oblasti vizualizace výsledků a následná realizace navržených úprav. Při absenci vhodné softwarové podpory pro intenzitní měření jsou tato v rámci výuky prováděna přímo z ovládacího prostředí analyzátoru PULSE, aplikací LabShop. Tento způsob je nevyhovující zejména z důvodu nedostatečného grafického zobrazení výsledků, problematickému exportu pro další zpracování a díky poměrně složitému ovládání aplikace.

3.1.1 Měřicí systém

Návrh měřicího systému představuje obrázek 3.1. Celý systém se opírá o uživatelskou aplikaci, která zajišťuje samotné měření i následné zpracování výsledků a díky které se proces měření značnou měrou zjednodušuje. Aplikace byla vytvořena v prostředí MATLABu (viz níže).



Obrázek 3.1: Návrh měřicího řetězce pro intenzitní měření

Měřicí systém splňuje dva hlavní požadavky – automatizaci měření a zpracování dat. Základní popis a funkčnost řetězce:

- **měření** – proces měření zabezpečuje aplikace LabShop PULSE (s příslušným projektem, který je již základně nakonfigurován – viz 2.4.1.1 *Architektura a systém multianalýzátoru PULSE*), spouštěná z uživatelské aplikace. Chod projektu je realizován jako OLE objekt ve skryté formě. Projekt LabShop snímá naměřená data, zároveň provádí real-timeovou analýzu a její výsledky (spektra, naměřená v jednotlivých bodech) exportuje v datovém souboru ve formátu *.mat. Po ukončení měření se LabShop automaticky ukončí.
- **zpracování dat** – základem je exportní soubor měření *.mat, který obsahuje naměřená spektra. Aplikace extrahuje spektra ze souboru, provádí aproximaci dat a základní výpočty, zobrazuje takto získané intenzitní hladiny i spektra ve zvoleném formátu, exportuje je jako obrazové či textové soubory a konečně spravuje a archivuje jednotlivá měření formou projektů. (*poznámka*: termín „projekt“ koliduje s označením projektu v LabShop PULSE, zde se však jedná o komplexní název konkrétního měření, který vypovídá o rozsahu měření a obsahuje příslušné datové soubory). Uživatel tak má možnost prostřednictvím aplikace obnovit libovolný projekt (nebo vytvořit nový) a buď v minulosti získaná data znovu zpracovat anebo opětovně naměřit.

Uživatel pouze spouští a ovládá procesy, které na obrázku 3.1 ilustrují šípky, vykreslené přerušovanou čarou bez výplně:

- základní konfigurace měření
- vizualizace výsledků
- export dat

Zjednodušený popis postupu při měření:

- spuštění uživatelské aplikace
- vytvoření, popř. načtení projektu měření
- definování počtu měřících ploch (spolu s definicí počtu měřících bodů na každé ploše a času průměrování)
- spuštění měření pro jednotlivé plochy
- zpracování a zobrazení výsledků (hladin intenzity, třetinooktávových spekter)
- export výsledků (obrazové soubory – intenzitní mapy, textové soubory – hodnoty hladin intenzity v dB)
- výpočet akustického výkonu

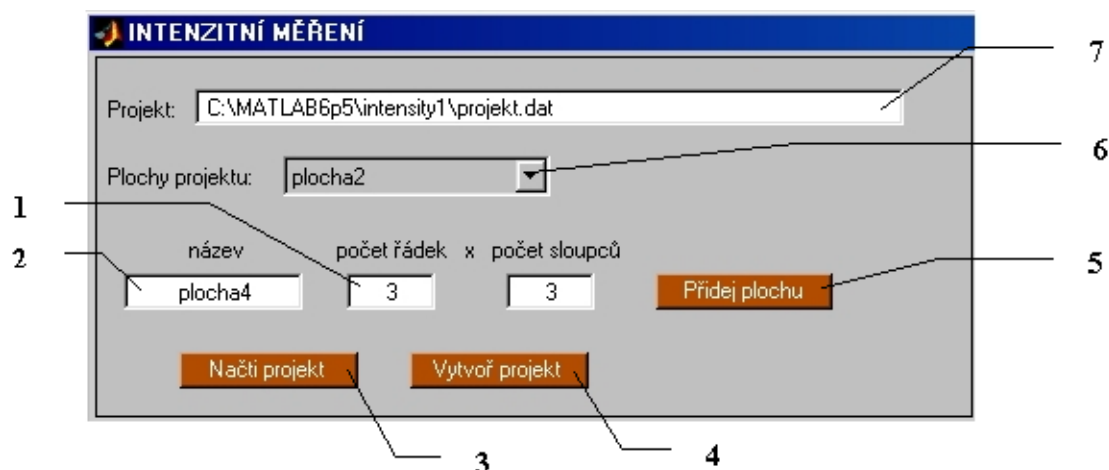
Konkrétní popis komponent systému je uveden v následujících kapitolách.

3.1.2 Uživatelská aplikace

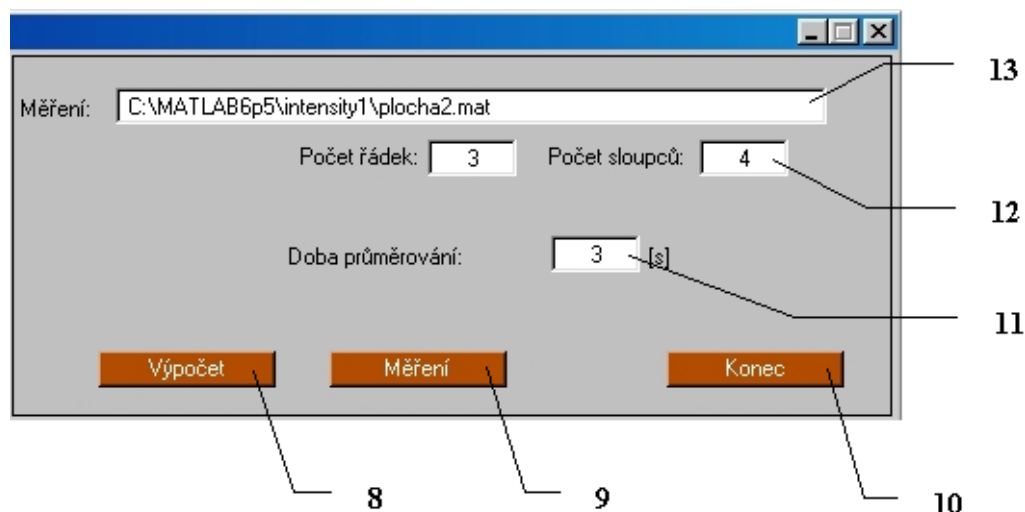
Pro naprogramování uživatelské aplikace bylo zvoleno prostředí *MATLAB 6.5*, které je optimální zejména pro vizualizaci výsledků. Konturové grafy patří ke standardní nabídce grafických funkcí a pro tvorbu intenzitních map se jeví jako ideální. Nemalou měrou přispěl k tomuto výběru i fakt, že *MATLAB* podporuje technologii *OLE* (*OLE – Object Linking and Embedding, Spojování a vkládání objektů* – technologie, vyvinutá firmou Microsoft s cílem umožnit přenos a sdílení informací mezi aplikacemi ve Windows), která byla využita pro komunikaci s projektem LabShop a pro jeho ovládání z prostředí uživatelské aplikace. Protože záměrem bylo vytvoření aplikace nejen jednoduché (jednoduše ovladatelné), ale i uživatelsky příjemné, je uživateli k dispozici grafické rozhraní (nikoliv pouze program, komunikující pomocí příkazové řádky), vytvořený pomocí systému *Handle Graphics*. Systém *Handle Graphics* je nástroj, s jehož pomocí lze efektivně pracovat s grafickými objekty v prostředí *MATLABu*. Jsou to např.: grafy, interaktivní tlačítka, zátržítka, textová pole, menu, atd. Zahrnuje příkazy pro 2D a 3D vizualizaci dat, zpracování signálů, animaci a grafiku obecně – z hlediska uživatele přináší vyšší efektivnost a mnoho možností při práci s grafikou.

3.1.2.1 Popis prostředí

Na obrázcích 3.2 a 3.3 je hlavní ovládací panel s načteným projektem měření. V zásadě je rozdělen na dvě části – část pro práci s projektem (definice počtu ploch a měřících bodů) a část pro práci s měřenou plochou (intenzitní měření, vyhodnocení výsledků). Tabulka 3.1 přiřazuje jednotlivým komponentám stručný popis.



Obrázek 3.2: Levá část hlavního panelu



Obrázek 3.3: Pravá část hlavního panelu

Tabulka 3.1: Popis komponent hlavního panelu

Komponenta	Stručný popis
1.	definice počtu řádek a přidávané plochy
2.	název nově přidávané plochy
3.	tlačítko pro načtení projektu měření
4.	tlačítko pro vytvoření nového projektu měření
5.	tlačítko pro přiřazení nové plochy do projektu měření
6.	menu pro výběr aktuální plochy projektu
7.	aktuální projekt (název a cesta k souboru)
8.	aproximace naměřených dat, výpočet hladin a vizualizace
9.	tlačítko pro start měření aktuální plochy
10.	tlačítko pro ukončení aplikace
11.	nastavení doby průměrování při procesu měření
12.	informativní zobrazení počtu řádek a sloupců vybrané plochy
13.	aktuální plocha (název a cesta k souboru)

Průběh měření, vizualizace dat a výpočet akustického výkonu jsou začleněny do zvláštních panelů z důvodu lepší přehlednosti a funkčnosti aplikace. Pro univerzálnost použití aplikace se rozměry všech použitých panelů přepočítávají pro použité grafické rozlišení monitoru při spuštění programu (parametrem *screensize*).

3.1.2.2 Programová struktura

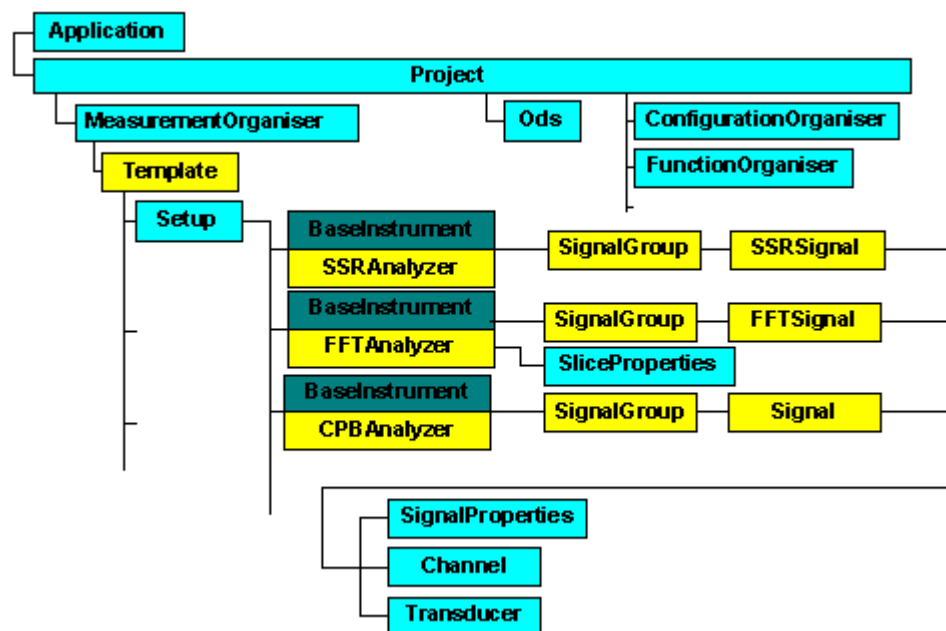
Jádro uživatelské aplikace tvoří základní m-file **intensit.m** s definicí grafických objektů, odkud jsou volány ostatní podprogramy ve formě funkcí:

- **data_fcn.m** – pro extrahování naměřených spekter ze souboru **.mat* (ten je vytvořen v LabShop PULSE po ukončení samotného měření)
- **matice_fcn.m** – pro aproximaci naměřených dat, výpočet hladin akustické intenzity a přípravu výsledků pro vizualizaci
- **export1_fcn** – pro exportování obrazových souborů (intenzitních map, ve formátech **.bmp*, **.jpg*)
- **export2_fcn** – pro exportování textových souborů (hladin intenzity, ve formátech **.txt*, **.dat*)
- **vykon_fcn.m** – pro výpočet akustického výkonu měřené plochy
- **pulse_intensit.m** – pro ovládání procesu měření (práce s LabShop PULSE)

Aplikace je naprogramována metodou *Switched Board Programming*, která využívá příkazů *switch* a *case* k tvorbě m-filů s důrazem na využití grafických prvků. Základem je využití specifické vlastnosti funkcí, a to možnosti volat sama sebe s různými parametry. Při spuštění bez parametrů se vykoná sekvence příkazů s definicí grafických prvků. Ten prvek, na který má být navázána určitá akce (tlačítko, výběr menu, atd.), obsahuje název *Callbacku*, identifikátoru, jehož interakcí se provádí příslušná příkazová sekvence – tedy opětovné volání funkce, ovšem již s parametrem. Tento parametr je textový a shodný s názvem *Callbacku*. Při komunikaci, uchovávání a předávání dat mezi jednotlivými funkcemi byl využit parametr grafických komponent *userdata* – imaginární schránka pro uložení dat v libovolném formátu.

3.1.3 Proces měření akustické intenzity

Z hlavního panelu aplikace dojde po stisku příslušného tlačítka k vyvolání funkce *pulse_intensit.m*. Proces měření se vztahuje k aktuální ploše projektu, zobrazené v editační řádce. Každá plocha má předdefinovaný počet sloupců (m) a řádek (n) a tedy i počet měřících bodů ($m \times n$). Vstupními parametry funkce jsou: n – počet řádků, m – počet sloupců, *PocetBodu* – počet měřících bodů, *AverageTime* – doba průměrování, *jmeno* – název souboru s naměřenými spektry. V úvodní části funkce se spustí aplikace LabShop PULSE jako ActiveX Server. Ke všem komponentám aplikace (organizátorům, nástrojům, atd.) přistupuje program jako k OLE objektům podle struktury, dostupné v dokumentaci LabShop. Každému objektu je přiřazen při jeho detekci identifikátor (*handle*) funkcí *get(handle, 'parametry')* a funkcí *set(handle, 'parametry')* se pak definují jeho konkrétní vlastnosti a nastavení – nastavení podřízeného objektu se děje pomocí jeho rodiče. Příklad práce s OLE objekty a jejich hierarchii v PULSE LabShop ilustruje obrázek 3.4 spolu s částí výpisu programu.



Obrázek 3.4: Hierarchie OLE objektů LabShop PULSE

Výpis příslušné části programu:

```
h=activexserver('Pulse.Labshop.Application');  
                                     % PULSE jako Activex server  
set(h, 'visible', 0);  
                                     % zneviditelní aplikaci LabShop PULSE  
myproject=invoke(h, 'OpenProject', 'C:\intensity_project.pls', 0, 0);  
                                     % otevření projektu  
mo=get(myproject, 'MeasurementOrganiser');  
                                     % detekce organizátoru měření  
htemplates=get(mo, 'Templates', 'Working');  
                                     % detekce záložky templates  
hsetup=get(htemplates, 'Setup');  
                                     % detekce záložky setup  
CPBAnalz=get(hsetup, 'Instruments', 'CPB Analyzer');  
                                     % výběr nástroje pro analýzu  
CPBState=get(CPBAnalz, 'AnalyzerState');  
                                     % proměnná CPBstate - stav analyzátoru  
set(CPBAnalz, 'AverageAndHoldLinAvgTime', AverageTime);  
                                     % nastavení času průměrování
```

3.1.3.1 Projekt LabShop

Výchozí projekt programu LabShop (je uložen ve stejném adresáři jako uživatelská aplikace pod názvem *intensity_project.pls*) zůstává pro každé spuštění neměnný a před začátkem každého měření dochází jen k nastavení některých parametrů – jedná se o dobu průměrování, velikost multibufferu pro sběr dat a jméno souboru, kde budou uložena naměřená spektra. Přednastaveným nástrojem pro analýzu je CPB analyzátor s konfigurací:

- dolní mezní frekvence: 20 Hz
- horní mezní frekvence: 20 kHz
- akustické vážení: A
- průměrování: lineární s dobou 5 s (- volitelný parametr)

Ostatní parametry nastavené v organizátoru měření:

- určovaná spektra: cross, auto
- výpočty: střední tlak, rychlost částic, intenzita, komplexní intenzita
- snímač: mikrofónový pár typu 4197, ½'', citlivost 11,9 mV/Pa
- vstupní kanál: maximální špičková hodnota na vstupu (vstupní rozsah) 7,071 V, filtr horní propust
- připojení k PC: Lan Interface Module 7533

3.1.3.2 Průběh funkce *pulse_intensit.m*

Intenzitní měření začíná po stisku manuálního triggeru na dálkovém ovladači sondy a v cyklu, jehož počet opakování je roven počtu měřených bodů, jsou snímána spektra u každého měřeného bodu. Po dobu měření spekter se ve zvláštním panelu, který je určen výhradně pro informace o probíhající měření, zobrazuje stav analyzátoru, celková doba měření a aktuální měřená pozice. Na panelu je zobrazena síť bodů (matice $[m \times n]$) a po skončení měření každého bodu se automaticky objeví výzva k měření na další pozici. Aby nedošlo k nekonečnému opakování cyklu (ať už z důvodu chyby analyzátoru nebo chyby komunikace mezi grafickými objekty), je cyklus vázán podmínkou na horní mezní hranici doby měření (neboli dobu jednoho cyklu – timeout), která je nastavena na 20 s. Po překročení této doby se cyklus přeruší, dojde k chybovému hlášení a posléze k návratu do hlavní funkce.

Výpis algoritmu testování podmínky (*CPBState* – stav analyzátoru, hodnota 4 znamená čekání na stisk triggeru):

```
timeout = 20; time = 1;
CPBState=get(CPBAnalz, 'AnalyzerState') ;
                                % test analyzátoru
for i=1:(PocetBodu + 1)

    while ((time<timeout) & (CPBState==4))
        CPBState=get(CPBAnalz, 'AnalyzerState') ;
                                % test analyzátoru
        set(findobj('tag','text7'),'string','<< running >>');
                                % zápis do grafických objektů panelu
        set(findobj('tag','text9'),'string',num2str(time));
        time=time+1;
        set(findobj('tag','text7'),'string',num2str(CPBState));
        pause(1);
    end

    time = 1;

    if (CPBState ~= 4)

        set(findobj('tag','text7'),'string','press Man.Trig. ');
        set(findobj('tag','text9'),'string','-');

        while CPBState ~= 4
                                %čekání na změnu stavu CPB - na stisk triggeru
            CPBState=get(CPBAnalz, 'AnalyzerState');
                                %test analyzátoru
        end
        else break;
    end
end
```

Po úspěšném naměření spekter všech bodů plochy se data uloží do souboru typu **.mat*, cesta k uložení souboru je identická s cestou k projektu měření a načítá se z editační řádky hlavního panelu.

3.1.4 Aproximace dat a výpočet hladin akustické intenzity

Před zpracováním dat probíhá jejich načtení ze souboru měření **.mat*. Tento proces zajišťuje funkce *data_fcn.m*, volaná jako první po stisku tlačítka „výpočet“ na hlavním panelu aplikace. Vstupními parametry funkce jsou *jmeno* – název souboru s daty a *PocetBodu* – počet naměřených bodů. Struktura načítaného souboru je poměrně složitá, soubor obsahuje kromě výkonů ve spektrech i informace o průběhu měření, stavech analyzátoru, naplnění multibufferu atd. Funkce vyhledá v souboru odpovídající data, která jsou uložena v pomyslné tabulce o $x+2$ sloupcích, kde x představuje počet měřených bodů. Každý z 31 řádků tabulky obsahuje výkon v příslušném spektru. Načítání je řešeno pomocí cyklu *while* s testovací podmínkou *ischar* – načítá soubor po řádcích funkcí *fgetl()*. Z řádků, které obsahují výkony ve spektrech, vyfiltruje požadované znaky (číslíce, znaménko, exponenty, oddělovače) a z takto upravených řádek načte čísla příkazem *sscanf()* v požadovaném formátu. Naskytá se otázka, proč není problém načtení výkonů řešen funkcí *sscanf()* hned zpočátku – je to z důvodu nestandardního oddělování sloupců v tabulce. Pomocí filtrování požadovaných znaků se cyklus naopak velmi zjednoduší, protože dojde k odstranění oddělovačů a jejich nahrazení mezerou. Výstupním parametrem funkce je tedy matice výkonů o velikosti [*PocetBodu* x 31]. Úspěšné otevření i uložení souboru je ošetřeno případným chybovým hlášením a v průběhu cyklu, při načítání dat, má uživatel na obrazovce k dispozici *waitbar* s informací o průběhu i předpokládané době dokončení načítání.

Jako druhá je volaná funkce *matice_fcn.m*, která obsahuje sekvence příkazů pro aproximaci dat a výpočet hladin akustické intenzity. Vstupními parametry jsou opět *PocetBodu* (počet naměřených bodů) a matice naměřených spekter o velikosti [*PocetBodu* x 31]. Postup při určení intenzitních hladin začíná vysčítáním spektrálních výkonů každého měřeného bodu, a to s výsledkem, představujícím matici hodnot akustické intenzity. Protože k vizualizaci je tato matice nepostačující (obsahuje pouze počet prvků, rovnající se počtu měřených bodů na ploše), jsou sloupce této matice aproximovány křivkou o 101 (případně 51) prvcích a každý z těchto prvků, tvořící

řádkové vektory (celkem 101 řádkových vektorů) opět aproximován křivkou s hustotou 101 prvků. Matice intenzit má tedy po aproximaci velikost $[101 \times 101]$, resp. $[51 \times 51]$ bodů, což je pro vykreslení v konturovém grafu postačující. Aproximace dat byla vyzkoušena dvěma metodami.

3.1.4.1 Maticová metoda

První způsob využívá standardní funkci MATLABu *csapi()*, jejímž vstupním parametrem je přímo matice hodnot. Má však značnou nevýhodu – neobsáhne při prokládání bodů i krajní přesahy měřených bodů. Jinak řečeno – naměříme-li na ploše v jednom sloupci tři body, budou první a třetí z nich zároveň prvním a posledním bodem v aproximované přímce, což znamená umístit tyto měřicí body na stejnou úroveň s okraji měřené plochy. Vykreslená intenzitní mapa bude méně přesná a pro její zpřesnění by bylo nezbytné zhustit síť měřených bodů.

3.1.4.2 Vektorová metoda

V druhé metodě byla aproximace hodnot v matici naprogramována pomocí cyklů – metoda vytváří postupně z každého sloupcového vektoru matice odhadnutou křivku, přičemž je možné takovéto křivce velikost okrajů pro odhadnutí dodefinovat (jde tedy o extrapolaci bodů). Z prvků sloupcových vektorů se stejným indexem je poté vytvořen vektor řádkový a tento opět aproximován. Pro aproximaci je využívána funkce *spline()*. O správnosti druhé metody, získané analyticky, svědčí fakt, že mapy vytvořené první i druhou metodou byly téměř identické. Ve druhém případě však mohou být rozšířeny o okraje měřených ploch. Nevýhodou použití druhé metody je skutečnost, že při velkých rozdílech hodnot v jednom vektoru (například tvoří-li 3 body vektoru parabolický průběh) mohou být doplněné přesahy číselně nepřiměřeně větší, než hodnoty použité pro odhad.

3.1.4.3 Výpočet intenzitních hladin

Po analýze výsledků obou metod byla jako vhodnější vybrána metoda první (i přes absenci odhadnutých přesahů) – odhadnuté přesahy v druhé metodě nejsou

v některých případech měření akceptovatelné. Rozměr matice byl snížen na plně vyhovujících [51 x 51] bodů.

Výpočet intenzitních hladin podle teoretického vztahu

$$L_I = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0},$$

$$I_0 = 1 \text{ pW} \cdot \text{m}^{-2}$$

probíhá v cyklu, přičemž záporné hodnoty akustické intenzity, vyjadřující opačný směr intenzitního toku, jsou ukládány s příznakem. Je to z důvodu použití dekadického logaritmu ve výpočtu. Výstupním parametrem funkce je jednak matice hladin, získaná aproximací, a jednak matice hladin, obsahující pouze hodnoty naměřené, o rozměru [m x n].

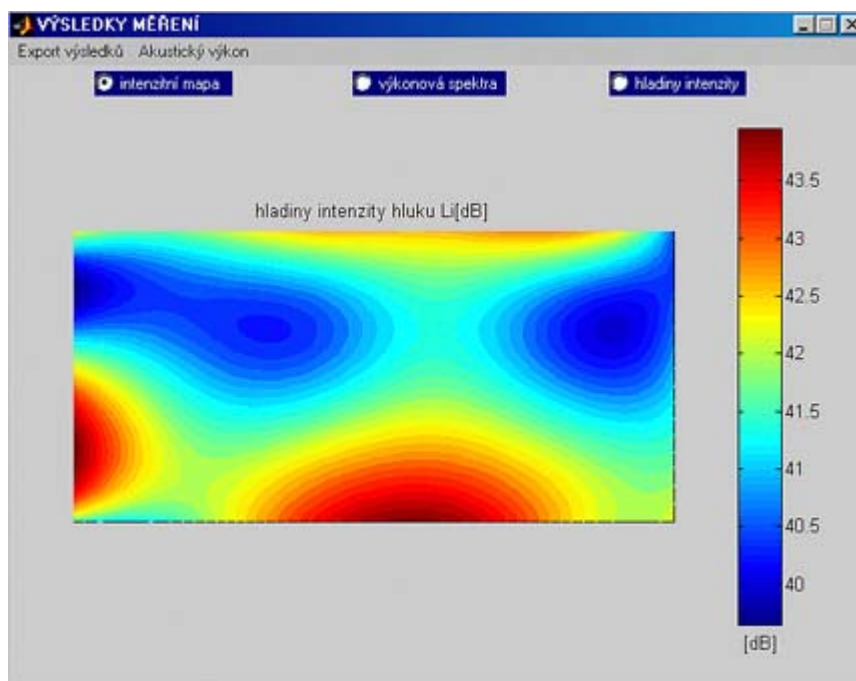
3.1.5 Vizualizace výsledků

Zobrazení výsledků je umístěno ve zvláštním panelu, jak bylo uvedeno v jedné z předchozích kapitol. Uživateli je k dispozici několik variant pro náhled na získaná data (sekvence příkazů pro všechna vykreslení jsou umístěny v hlavním programu *intensit.m*, pod příslušným Callbackem), výběr závisí na volbě příslušného radiobuttonu.

3.1.5.1 Intenzitní mapy

Prvním výběrem je volba intenzitní mapy. Intenzitní mapa je konturový graf, vykreslený příkazem *contourf()* s volitelným parametrem počtu barev. Jako optimální počet barev bylo zvoleno spektrum o 30-ti prvcích, které zřetelně, ovšem nikoliv nepřiměřeně hustě mapuje přechody mezi hodnotami intenzitních hladin. Pro lepší zvýraznění barevných detailů je potlačena funkce zobrazení černých obrysů jednotlivých barevných pásem v grafu. Vpravo od mapy je umístěn *colorbar*, barevná stupnice s příslušnými hodnotami. Na první pohled je zřejmé rozmezí intenzitních hladin, které se v grafu vyskytují. Stupnice na ose *colorbaru* nezastupuje každou z hodnot, a to z důvodu lepší čitelnosti. MATLAB kromě funkce *contourf()*, nabízí možnost použití funkce *pcolor()*, jejíž výsledky jsou při správném použití téměř

identické s konturami. Příklad intenzitní mapy je na obrázku 3.5. Intenzitní mapu je možné pro potřeby dokumentace exportovat ve zvoleném formátu obrazového souboru (viz kapitolu 3.1.7.2 *Export naměřených dat*).



Obrázek 3.5: Vizualizace výsledků – intenzitní mapa

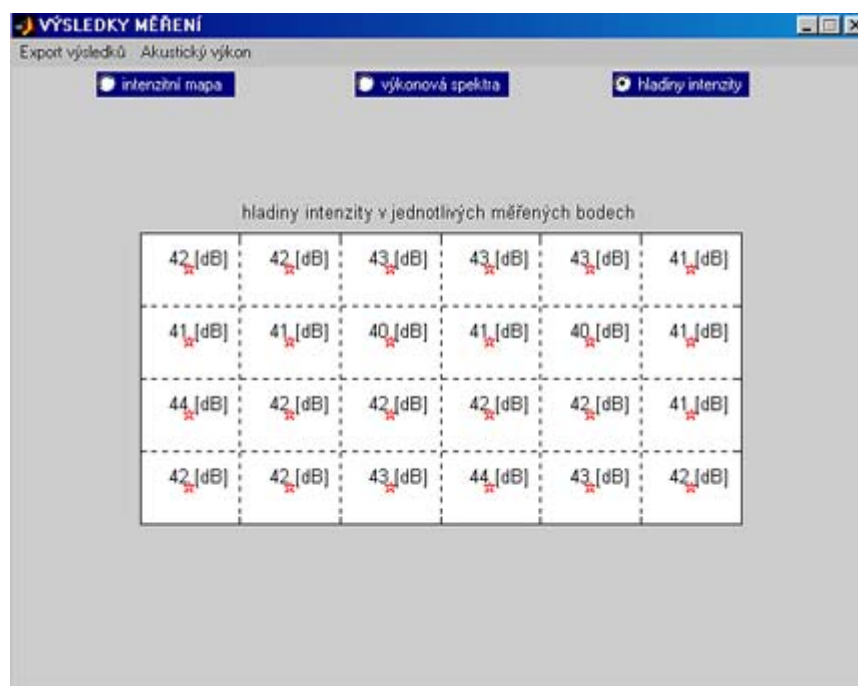
3.1.5.2 Výkonová spektra

Druhá volba zobrazení vykresluje naměřená výkonová spektra do 3D sloupcového grafu. Jde spíše o ilustrační zobrazení, které však poskytuje přehled o naměřených výkonech a rovněž porovnání výkonových charakteristik v jednotlivých bodech není nezajímavé. Na vodorovných osách jsou vyneseny měřené body a frekvence (spektra), na svislé pak výkony, ovšem v absolutních hodnotách. Vykreslení hodnot na zápornou osu (při naměření intenzity v opačném směru) působí spíše chaoticky a zpravidla se nepoužívá.

3.1.5.3 Zobrazení intenzitních hladin

Třetí zobrazení vykresluje na panel síť měřených bodů s pořadovými čísly (podobně jako v informativním panelu o průběhu měření) a přiřazuje jim odpovídající

intenzitní hladiny. Zajímavé je porovnání s intenzitní mapou, kde je výskyt případných extrémů intenzitních hladin velmi dobře patrný. Rozměr sítě při vykreslení (stejně jako při vykreslování mapy) odpovídá zvolenému poměru počtu řádek a sloupců na ploše, přičemž maximálně využívá dostupnou plochu. Fakt, že poměr rozměrů stran zobrazení odpovídá poměru délek stran měřené reálné plochy, je užitečný při orientaci v grafu a při lokalizaci zdrojů hluku. Příklad vykreslení hladin na ploše, která byla proměřena na 24 bodech, je na obrázku 3.6.



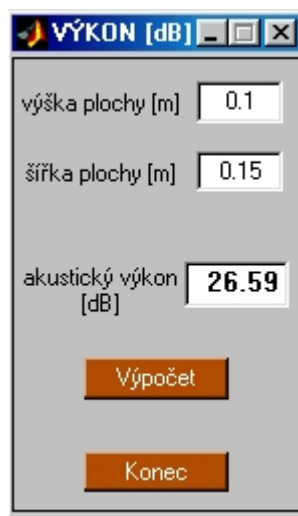
Obrázek 3.6: Vizualizace výsledků – hladiny intenzity v měřených bodech

3.1.6 Výpočet akustického výkonu

Výpočet akustického výkonu aktuální měřené plochy je doplňkovou funkcí aplikace a jeho hodnota je pouze informativní. Pro stanovení přesné celkové hodnoty by bylo nutné proměřit zdroj hluku komplexně – tzn. všechny plochy obklopující zdroj a dílčí výsledky pak sečíst (nikoliv však v decibelových hodnotách).

Funkce *vykon_fcn.m* vyvolá zvláštní panel a po editaci rozměrů plošky, uprostřed které se nachází měřící bod, vysčítá výkony v jednotlivých změřených bodech. Převod do decibelových hodnot probíhá podle logaritmického vztahu pro určení hladiny akustického výkonu (viz kapitolu 2.3.4.1 *Metoda měřením v bodech*). Panel

pro výpočet výkonu je na obrázku 3.7.



The image shows a graphical user interface window titled "VÝKON [dB]". Inside the window, there are three input fields: "výška plochy [m]" with the value "0.1", "šířka plochy [m]" with the value "0.15", and "akustický výkon [dB]" which displays the calculated value "26.59". Below these fields are two orange buttons: "Výpočet" (Calculate) and "Konec" (End).

Obrázek 3.7: Panel pro určení akustického výkonu

3.1.7 Systém správy dat

Pro lepší orientaci v procesu měření a jeho přehlednější strukturu byl navržen systém správy dat, který na rozdíl od dosavadního způsobu (pouze archivace souborů naměřených spekter) umožňuje systematické ukládání výsledků a informací o rozsahu měření. Rozsahem se rozumí počet měřených ploch, které uživatel měřil anebo bude měřit spolu s informacemi o příslušných počtech řádků a sloupců. Výsledky měření (exportní soubory intenzitních map a hladin) jsou uživateli k dispozici pro další použití bez nutnosti spouštění aplikace a opětovného měření.

3.1.7.1 Centrální archivace projektů měření

Pro každé měření (pro každý měřený objekt, nikoliv plochu) je uživatelem vytvořen samostatný projekt – složka souborů, bezprostředně souvisejících s měřením. Složka obsahuje tyto soubory:

- informační soubor projektu **.dat*
- soubory naměřených spekter **.mat*
- případné exportní soubory **.jpg*, **.bmp*, **.txt*, **.dat*

Po založení projektu se jako první vytvoří informační soubor. Do založeného projektu přidává uživatel podle uvážení jednotlivé měřené plochy stiskem tlačítka

„přidej plochu“. Plochám je implicitně přiřazován název *Plocha* s indexem, označujícím pořadí. Název s příslušným indexem se generuje automaticky v nabídce, program eviduje počet již přidanych komponent do projektu. Před přiřazením nastavuje uživatel počet řádek a sloupců, tzn. počet měřených bodů na ploše. Přidaná součást se objeví v popupmenu se seznamem všech ploch a zároveň se zapíše do informačního souboru o projektu. Ten má textovou strukturu s příponou *.dat* a obsahuje počet a názvy ploch s odpovídajícími počty sloupců a řádek. Soubor je využíván pro načítání informací při případném otevření již existujícího projektu. Při vytváření nového projektu se otevře dialogové okno s přednastavenou cestou a volitelným jménem projektu, po uložení se stejná cesta zobrazí i v editační řádce v pravé části panelu pro práci s vybranou plochou. Po volbě příslušné plochy (pro měření anebo pro vizualizaci) se k cestě automaticky připojí její název – uživatel tak má přehled o umístění souboru.



Obrázek 3.8: Struktura projektu měření

3.1.7.2 Export naměřených dat

Pro pozdější použití ve zprávách o provedeném měření umožňuje aplikace exportovat naměřená data i výsledky po jejich zpracování v několika formátech. Jsou to jednak obrazové soubory, obsahující intenzitní mapy a jednak textové soubory, obsahující intenzitní hladiny v decibelových hodnotách.

3.1.7.2.1 Obrazové soubory

Obrazové soubory je možné ukládat ve dvou nejčastěji používaných formátech, jako bitmapu **.bmp* a jako interaktivní formát **.jpg*. Oba dva případy řeší funkce *export1_fcn.m*, volaná z hlavního programu s parametrem, určujícím zvolený typ.

Funkce vyvolá nové okno, do kterého je nejprve znovu vykreslena aktuální intenzitní mapa (matici hladin načítá funkce z *userdata* jedné z grafických komponent, radiobuttonu pro výběr zobrazení intenzitní mapy) v předdefinované neměnné velikosti. I tato funkce zjišťuje před vykreslením nastavení rozlišení monitoru, aby zajistila univerzálnost svého použití. Intenzitní mapa obsahuje colorbar s rozsahy zobrazených hodnot, stejně jako v panelu vizualizací. Vykreslování mapy do zvláštního okna je nutné – při exportu z panelu vizualizací se v obrazovém souboru uloží i ovládací prvky (výběrové radiobuttony). Jedním z možných řešení je také nastavení ovládacích prvků do skrytého režimu před exportem a po exportu jejich zviditelnění, to ovšem komplikuje přepínání mezi jednotlivými typy vizualizace dat – překreslování panelu by v tomto případě vyžadovalo jeho zavření a opětovné otevření. To by znamenalo zbytečné zpomalení běhu aplikace při zpracování obsáhlejších souborů měření.

Po úspěšném uložení souboru (cesta k uložení je shodná s umístěním informačního souboru projektu a souborů **.mat* měření) čeká aplikace na potvrzení informace o provedení akce.

3.1.7.2.2 Textové soubory

Soubory intenzitních hladin v textovém formátu jsou ukládány s ohledem na variabilitu jejich dalšího použití – import do jiných programů. Funkce *export2_fcn.m* je volána stejně jako v prvním případě s parametrem, označujícím zvolený typ – **.txt*, **.dat*. Zápis do souboru je realizován funkcí *fprintf()*.

Struktura textového souboru je velmi jednoduchá a značně ulehčuje případné načítání hladin. První řádka obsahuje typ souboru, na dalších je pak uveden název projektu, název zobrazované plochy projektu, počet řádek a sloupců plochy. Všechna data jsou na zvláštní řádce, ukončené znakem pro odřádkování *\n*. Následuje výpis souřadnic jednotlivých změřených bodů spolu s hladinami v decibelech. Měřené body jsou vypisovány po řádcích, jejich pořadí je stejné jako v zobrazení intenzitních hladin (viz kapitolu 3.1.5 *Vizualizace výsledků*). Po kompletním výpisu všech bodů na každý řádek zvlášť jsou hladiny vykresleny v maticové formě.

Příklad textového exportního souboru:

```
MERENI AKUSTICKE INTENZITY
PROJEKT:
mereni_25_3_05.dat
SOUBOR:
Plocha1.mat
POCET RADEK:
3
POCET SLOUPCU:
3

1,1
58
1,2
-35
...
3,3
28

[-23 40 28;35 38 26;58 -35 -38]
KONEC
```

Struktura umožní načtení dat v jednoduchém cyklu, pouze se znalostí čísla řádku (jejichž index má konstantní inkrement), event. načtení řádku jediného – dat v maticovém zápisu a následného formátovaného čtení. Také v tomto případě čeká aplikace po úspěšném uložení souboru (cesta k uložení je shodná s umístěním informačního souboru projektu a souborů *.mat měření) na potvrzení informace o provedení akce. V případě existence souboru se shodným názvem a umístěním dojde k jeho přepsání souborem aktuálním.

3.2 Demonstrace měření na reálném příkladu

Navrhovaný systém byl prověřen na dvou reálných případech – na prvním z nich byla testována funkce lokalizace zdrojů hluku, druhý případ demonstruje použití systému pro stanovení celkového akustického výkonu průmyslového zařízení.

3.2.1 Lokalizace zdrojů hluku tkacího stroje

Na jednom z pracovišť textilní fakulty bylo provedeno měření za účelem lokalizace zdrojů hluku tkacího stroje. Měření bylo zaměřeno pouze na jednu z pomyslných ploch, obklopujících zdroj hluku (na obrázku 3.9 je označena červeně).

měřená plocha:

pokrývající celou svrchní plochu objektu s výjimkou pohonné jednotky

rozměry plochy:

1,55 x 2,20 m

počet měřících bodů:

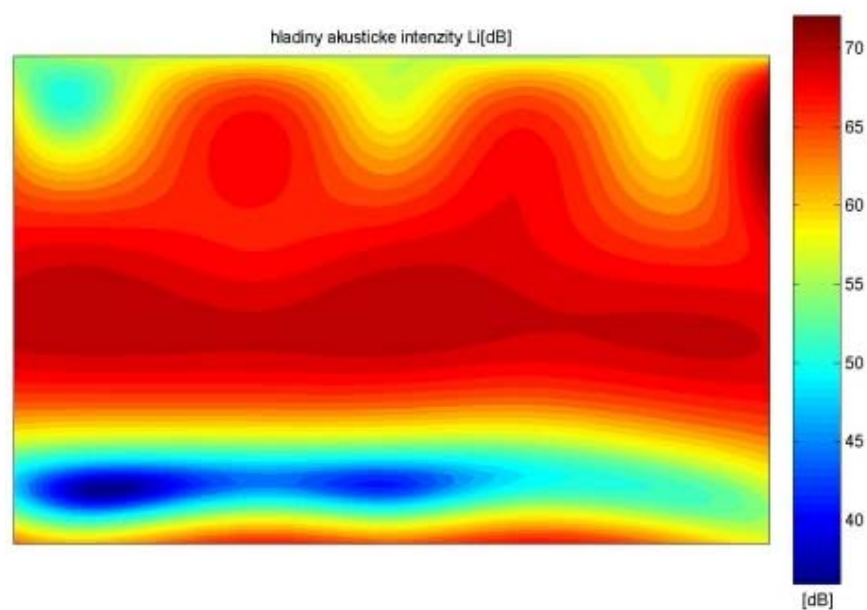
42 (6 řad po 7-mi bodech)

měřený objekt:



Obrázek 3.9: Tkací stroj s vyznačenou měřenou plochou

výsledná intenzitní mapa:



Obrázek 3.10: Intenzitní mapa změřené plochy

zhodnocení:

Na intenzitní mapě, zobrazené v konturovém grafu na obrázku 3.10, jsou ve střední části měřené plochy zřetelně vidět největší zdroje hluku – nitěnky, kterými jsou naváděny osnovní nitě. Lze tedy konstatovat, že při lokalizaci zdrojů hluku se navrhovaný systém plně osvědčil.

3.2.2 Stanovení celkového akustického výkonu klimatizační jednotky

Metodou měření v bodech, která je implementována v navrhovaném měřicím systému, byla stanovena hladina celkového akustického výkonu klimatizační jednotky za provozu na čtvrtém výkonovém stupni.

Měření bylo provedeno v prostorách školní laboratoře.

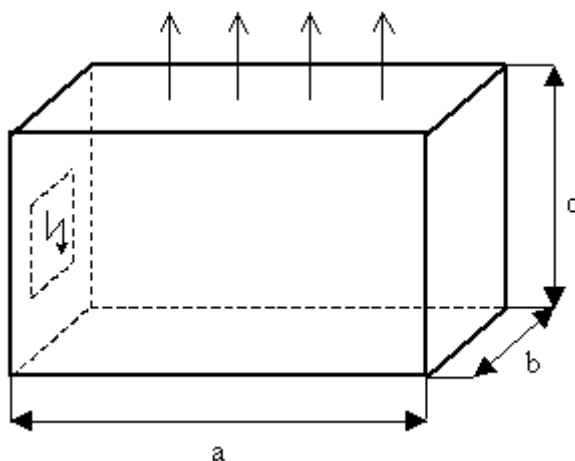
pomocné schéma:

rozměry:

$a = 0,8 \text{ m};$

$b = 0,22 \text{ m};$

$c = 0,45 \text{ m};$



Obrázek 3.11: Plochy, obklopující zdroj hluku

postup výpočtu:

$$1) W_i = \sum_{k=1}^{P_B} S_k \cdot I_k$$

[W] ... akustický výkon i-té plochy měřením v bodech

P_B ... počet měřených bodů na ploše

S_k ... obsah dílčí plošky obklopující měřený bod

I_k ... akustická intenzita v k-tém bodě

$$L_{Wi} = 10 \log_{10} \frac{W_i}{W_0} \quad [\text{dB}] \quad \dots \text{ hladina akustického výkonu } i\text{-té plochy}$$

$$W_0 = 1 \text{ pW} \quad [\text{W}] \quad \dots \text{ referenční hladina akustického výkonu}$$

- L_{Wi} je výstupem uživatelské aplikace, je vypočítána automaticky po volbě funkce pro stanovení akustického výkonu

Akustické výkony jednotlivých ploch musí být korigovány příslušným faktorem (viz bod 4), neboť celkový obsah i -té plochy neodpovídá součtu obsahů dílčích plošek S_k (tzn. měřené body byly umístěny i na okrajích měřené plochy).

$$3) W_i = 10^{L_w/10} W_0 \quad [\text{W}] \quad \dots \text{ zpětný výpočet akustického výkonu } i\text{-té plochy}$$

- pro další výpočty je nutné získat z decibelového vyjádření hodnotu výkonu ve wattech

$$4) K_i = \frac{(m-1) \cdot (n-1)}{m \cdot n} \quad [-] \quad \dots \text{ korekční faktor}$$

m ... počet sloupců na měřené ploše

n ... počet řádek na měřené ploše

- ke každé ploše je vypočítán již zmíněný korekční faktor

$$5) W_{Ki} = K_i \cdot W_i \quad [\text{W}] \quad \dots \text{ akustický výkon } i\text{-té plochy po korekci}$$

- skutečný výkon příslušné i -té plochy

$$6) W = \sum_{i=1}^6 W_{Ki} \quad [\text{W}] \quad \dots \text{ celkový akustický výkon}$$

$$L_W = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0} \quad [\text{dB}] \quad \dots \text{ hladina celkového akustického výkonu}$$

- určení akustického výkonu celého zařízení – součet výkonů všech změřených ploch a převedení do decibelového vyjádření

tabulky a vypočítané hodnoty:

Tabulka 3.2: Označení ploch

číslo	umístění	rozměr	S[m ²]
1.	horní	a x b	0,176
2.	zadní	a x c	0,36
3.	přední	a x c	0,36
4.	levá boční	b x c	0,099
5.	pravá boční	b x c	0,099
6.	dolní	a x b	0,176

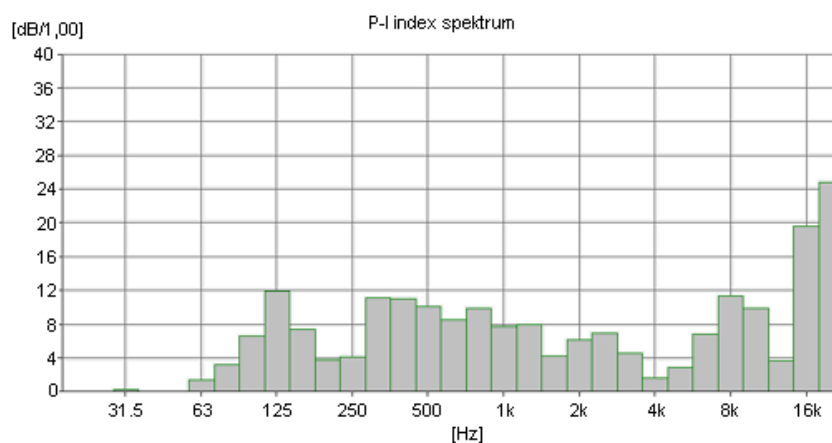
Tabulka 3.3: Hladiny akustických výkonů jednotlivých ploch

plocha	P B	n x m	S _k [m ²]	K _i [-]	L _{Wi} [dB]	W _i [Watt]	W _{Ki} [Watt]
1.	18	3 x 6	0,0176	0,5555	42,06	$1,6069 \cdot 10^{-8}$	$8,9272 \cdot 10^{-9}$
2.	24	4 x 6	0,024	0,625	39,68	$9,2897 \cdot 10^{-9}$	$5,8061 \cdot 10^{-9}$
3.	24	4 x 6	0,024	0,625	39,63	$9,1833 \cdot 10^{-9}$	$5,7396 \cdot 10^{-9}$
4.	12	4 x 3	0,0165	0,5	35,59	$3,6224 \cdot 10^{-9}$	$1,8112 \cdot 10^{-9}$
5.	12	4 x 3	0,0165	0,5	35,49	$3,5400 \cdot 10^{-9}$	$1,7700 \cdot 10^{-9}$
6.	18	3 x 6	0,0176	0,5555	41,52	$1,4191 \cdot 10^{-9}$	$7,8839 \cdot 10^{-9}$

celkový akustický výkon:

$$L_w = 45,04 \text{ dB}$$

hladiny P-I indexu v místě měření:



obrázek 3.12: Graf hladin P-I indexu v místě měření

zhodnocení:

Měření proběhlo v podmínkách akceptovatelných příslušnou normou, včetně hladin P-I indexu (viz obrázek 3.12), které odpovídají indikátoru F₂ (viz 2.3.4.1 Metoda měření v bodech). Intenzitní mapy jednotlivých ploch jsou vykresleny v příloze 1.

4. Závěr

Práce splnila všechny body zadání, tak jak byly specifikovány v zásadách pro vypracování. Po zpracování teorie intenzitních měření a osvojení základních principů měření na používaných zařízeních (intenzitní sondě B&K 3599 ve spojení s analyzátozem PULSE) byl úspěšně realizován návrh komplexního systému, který splňuje požadavky moderního přístupu k průmyslovému měření a odpovídá normě ISO 9614. Realizovaný systém je nástrojem pro lokalizaci zdrojů hluku, stanovení akustického výkonu a tvorbu intenzitních map.

Uživatelská aplikace, o kterou byl rozšířen základní měřicí řetězec, praktickým způsobem komunikuje s analyzátozem PULSE (pomocí technologie OLE) a po získání dat umožňuje jejich okamžité zpracování. Aplikace ve svém grafickém rozhraní nabízí uživateli kromě několika režimů zobrazení výsledků i funkce pro jejich export. Naměřená data jsou organizována do projektů, což značně zefektivnilo jejich pozdější využití.

Největším přínosem diplomové práce je zjednodušení a automatizace procesu měření a kvalitní vizualizace výsledků ve formě intenzitních map.

Systém byl testován na dvou reálných případech, jednou jako nástroj pro lokalizaci zdrojů hluku a jednou za účelem stanovení celkového akustického výkonu průmyslového zařízení. V obou případech se prokázala účinnost intenzitní metody, funkčnost realizovaného systému a jeho praktická využitelnost.

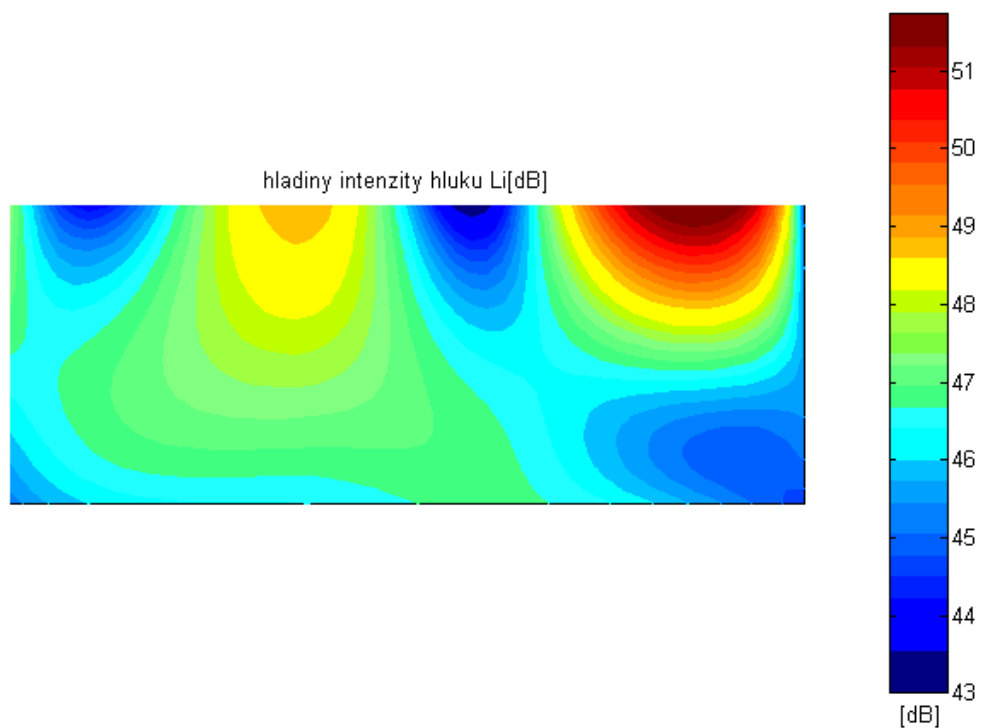
Jednou z možností rozšíření navrženého systému by bylo zpracování přesného algoritmu měření podle normy ISO 9614-1 s využitím identifikátorů a jeho začlenění do uživatelské aplikace.

Literatura

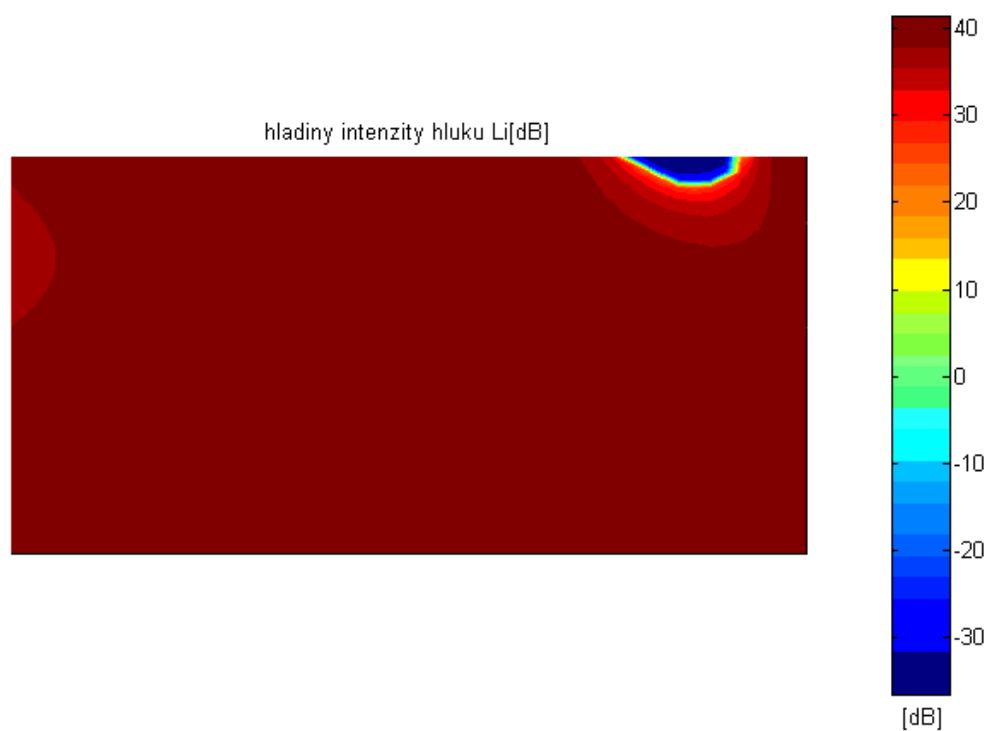
- [1] Hassahl J.R., Zaveri K., Phillips M.: Acoustic Noise Measurement, Brüel&Kjaer
- [2] Smetana C. a kol.: Hluk & Vibrace, Měření a hodnocení, SDĚLOVACÍ
TECHNIKA, 1998
- [3] Intensity Measurement, Hewlett Packard
- [4] Sound Intensity, Brüel&Kjaer
- [5] Technical documentation PULSE
- [6] Začínáme s PULSE, Brüel&Kjaer , 2004
- [7] Nový R.: Hluk a chvění, ČVUT, 1995
- [8] Zaplatílek K., Doňar B.: Matlab – tvorba uživatelských aplikací, BEN, 2004
- [9] Heringová B., Hora P.: Matlab – díl I., II., H-S, 1995
- [10] www.bksv.com, internetové stránky firmy Brüel&Kjaer

Příloha 1

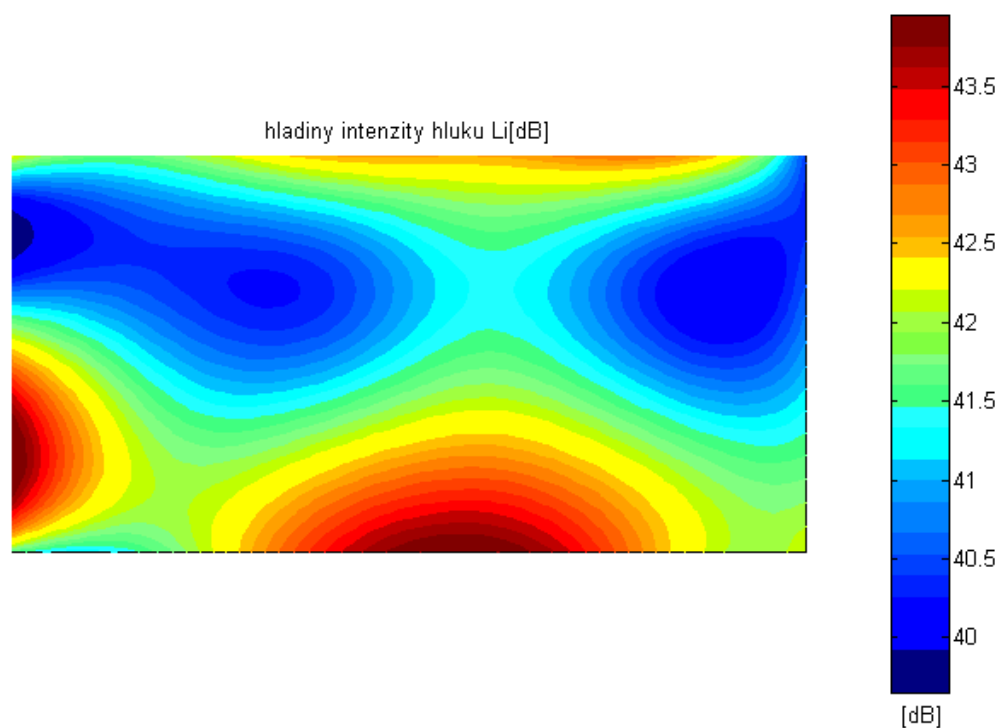
Intenzitní mapy měřeného objektu (viz kapitolu 3.2.2 *Stanovení celkového akustického výkonu klimatizační jednotky*).



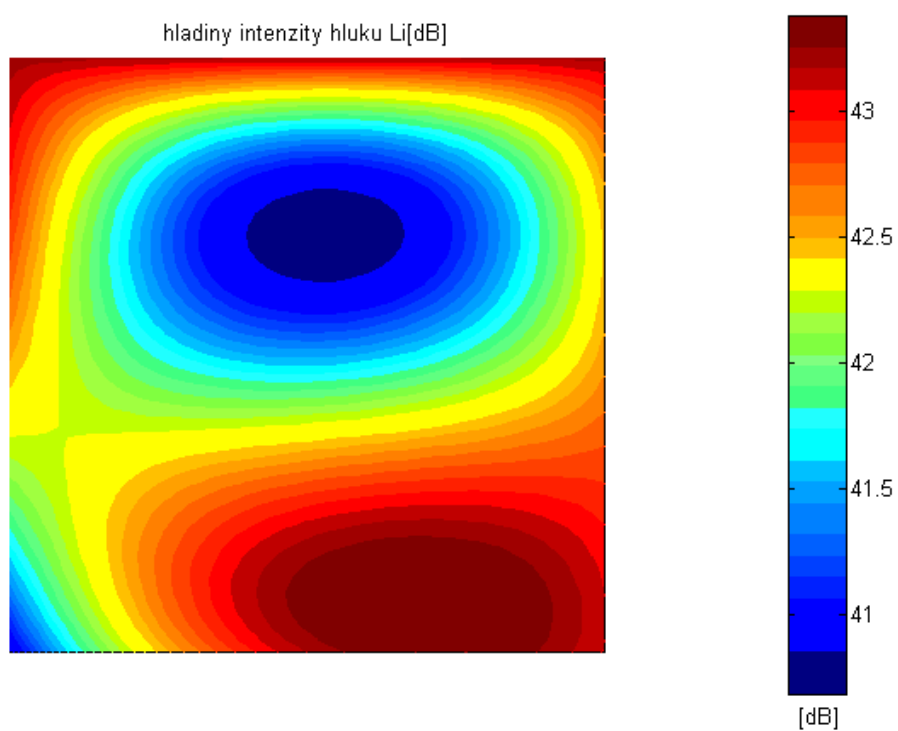
Obrázek P1.1: Intenzitní mapa – plocha č.1 měřeného objektu



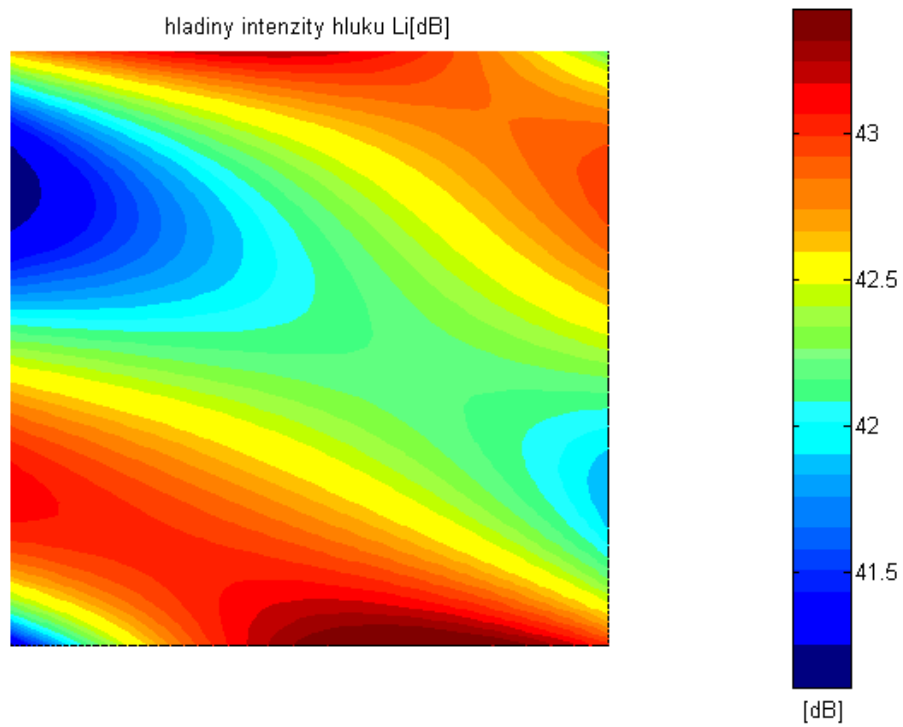
Obrázek P1.2: Intenzitní mapa – plocha č.2 měřeného objektu



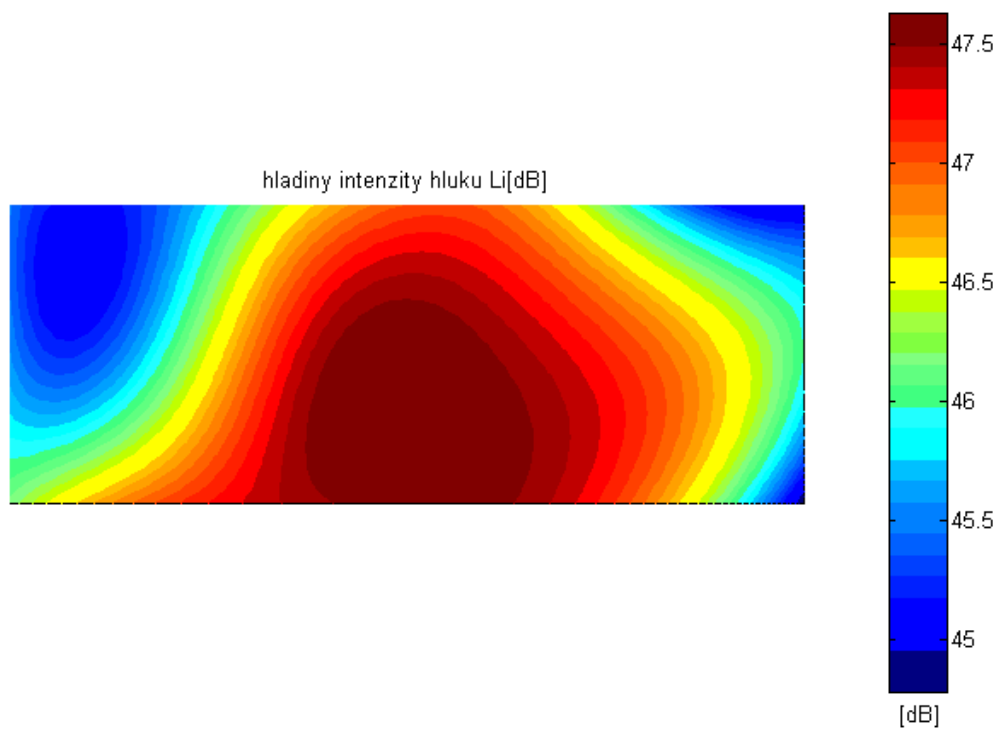
Obrázek P1.3: Intenzitní mapa – plocha č.3 měřeného objektu



Obrázek P1.4: Intenzitní mapa – plocha č.4 měřeného objektu



Obrázek P1.5: Intenzitní mapa – plocha č.5 měřeného objektu



Obrázek P1.6: Intenzitní mapa – plocha č.6 měřeného objektu

Příloha 2

Stručný návod pro obsluhu uživatelské aplikace

- **start aplikace**

spuštěním souboru *intensit.m* v prostředí MATLABu (verze 6.5 a vyšší)

- **vytvoření nového projektu měření**

tlačítkem *Vytvoř projekt* – informační soubor **.dat* umístit v příslušném adresáři

- **načtení projektu měření**

tlačítkem *Načti projekt* – otevření informačního souboru **.dat*

- **přidání plochy do projektu**

tlačítkem *Přidej plochu* – po definici počtu řádek a sloupců, tzn. počtu měřených bodů

- **výběr plochy pro měření nebo vizualizaci již naměřených dat**

v popupmenu s názvem *Plochy projektu*

- **proměření plochy**

tlačítkem *Měření* (po výběru plochy v popupmenu a zadání času průměrování)
→ otevření panelu PRŮBĚH MĚŘENÍ

- start měření tlačítkem *Man.Trig.* na dálkovém ovladači sondy (po zobrazení nápisu *press Man.Trig.*)
- po dokončení měření příslušného bodu → přesun na další pozici, start opět po zobrazení nápisu *press Man.Trig.*

- **vizualizace již proměřené plochy**

tlačítkem *Výpočet* (po výběru plochy v popupmenu) → otevření panelu VÝSLEDKY MĚŘENÍ

- volba zobrazení přepínáním příslušného radiobuttonu
- export obrazových nebo textových dat – v menu *Export dat*
- stanovení hladiny akustického výkonu plochy – v menu *Akustický výkon*, po zadání rozměrů dílčí plošky stiskem tlačítka *Výpočet*

- **ukončení běhu aplikace**

tlačítkem *Konec*

Příloha 3

CD se zdrojovými kódy uživatelské aplikace pro měření akustické intenzity a průvodní zprávou.

CD obsahuje:

- v adresáři **Intensit**

- soubor *info.txt*
- soubor *data_fcn.m*
- soubor *export1_fcn.m*
- soubor *export2_fcn.m*
- soubor *intensit.m*
- soubor *matice_fcn.m*
- soubor *pulse_intensit.m*
- soubor *vykon_fcn.m*

- v adresáři **Diplomová práce**

- soubor *dp_martin_junek.pdf*